

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa Mestrado Profissionalizante em Máquinas Elétricas

Girantes – Convênio WEG - UFSC

James Alberto Giacomazzi Junior

**ENROLAMENTOS DE MOTORES DE
INDUÇÃO TRIFÁSICOS UTILIZANDO A
TEORIA DA MODULAÇÃO DE PÓLOS**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Nelson Sadowski, Dr.

Florianópolis, 30 de novembro de 2007

ENROLAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS UTILIZANDO A TEORIA DA MODULAÇÃO DE PÓLOS


James Alberto Giacomazzi Junior

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

“MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA”

e aprovada na sua forma final pelo

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica




Prof. Nelson Sadowski, Dr.

ORIENTADOR



Prof. Renato Carlson, Dr.

CO-ORIENTADOR



Prof.^a Kátia Campos de Almeida, Dr.^a.

COORDENADORA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

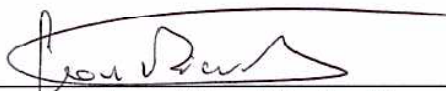
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Fredemar Rüncos, Dr.



Prof. Sebastião Lauro Nau, Dr.



Jean Viane Leite, Dr.

Ao meu pai, James

À minha mãe, Denise

Ao meu irmão, Gustavo

À minha namorada, Fernanda

AGRADECIMENTOS

A minha família, em especial aos meus pais, James e Denise, pelo apoio, orientação e amor incondicional em todos os momentos da minha vida.

Ao professor Nelson Sadowski, por quem tenho grande amizade, admiração e respeito, pela orientação neste trabalho.

Ao meu irmão, Gustavo, por estar sempre presente.

À minha namorada e sua família, pela companhia, compreensão e amor.

A Deus, pela onipresença, mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao Sr. Fredemar Runcos, que sempre acreditou no meu potencial, desde o início da minha vida profissional.

À WEG, por me conceder esta grande oportunidade de realizar o Mestrado Profissionalizante em Máquinas Elétricas Girantes.

Aos membros da banca, Sebastião e Renato, pelas contribuições.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, pela oportunidade a mim concedida de poder ampliar meus conhecimentos.

A todos os amigos de mestrado e da WEG Máquinas, pela amizade.

Aos meus colegas, Tiago, Samir, Jean, Telles, Pedro, Gleuber, que de uma forma ou de outra me forneceram apoio.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho pudesse ser concretizado.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	8
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS.....	13
LISTA DE SÍMBOLOS	14
RESUMO.....	17
ABSTRACT.....	18
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO	20
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2 CONCEITOS BÁSICOS DE ENROLAMENTOS PARA MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES.....	22
2.1 INTRODUÇÃO	22
2.2 CONCEITOS	22
2.2.1 Terminologia da Bobina	22
2.2.2 Passo Polar (t_{pl})	23
2.2.3 Número de Ranhuras por Pólo e Fase (q_1)	24
2.2.4 Passo do Enrolamento (t_{st})	25
2.2.5 Regiões de Simetria (S)	26
2.2.6 Condições de Simetria	26
2.2.7 Tipos de Enrolamentos	28
2.3 FORÇA ELETROMOTRIZ EM ENROLAMENTOS DE CORRENTE ALTERNADA	36
2.3.1 FEM em um condutor	36
2.3.2 FEM em um enrolamento distribuído	37
2.3.3 FEM em um enrolamento com passo encurtado	40

2.4 CONCLUSÕES	43
3 MUDANÇA DE VELOCIDADE	44
3.1 INTRODUÇÃO	44
3.2 VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA.....	45
3.3 ALTERAÇÃO DA POLARIDADE	46
3.3.1 Enrolamento Dahlander	46
3.4 ENROLAMENTOS INDEPENDENTES	55
3.5 CONCLUSÕES	55
4 TEORIA DA MODULAÇÃO DOS PÓLOS	57
4.1 INTRODUÇÃO	57
4.2 MODULAÇÃO DA FASE	58
4.3 CAMPOS HARMÔNICOS	65
4.4 ONDA DE MODULAÇÃO	67
4.5 TIPOS DE ENROLAMENTOS PAM	69
4.5.1 Enrolamento PAM Tipo I	70
4.5.2 Enrolamento PAM Tipo II	77
4.6 CONCLUSÕES	82
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	83
5.1 INTRODUÇÃO	83
5.2 SELEÇÃO E PREPARAÇÃO DOS PROTÓTIPOS	83
5.3 BOBINAGEM DOS PROTÓTIPOS.....	85
5.4 ENSAIOS DOS PROTÓTIPOS	89
5.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	90
5.6 CONCLUSÕES	92
6 ANÁLISE DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DO PAM	93
6.1 INTRODUÇÃO	93
6.2 MUDANÇA DE VELOCIDADE	93

6.3 CARGAS PARABÓLICAS	94
6.4 COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS DE VARIAÇÃO DE VELOCIDADE	96
6.5 CONCLUSÕES	99
7 CONCLUSÕES	100
7.1 OPORTUNIDADES FUTURAS	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
ANEXO 1 – DESENHO DO POLÍGONO DE GOERGES.....	103
ANEXO 2 – RELATÓRIOS DE ENSAIO	118

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Passo Polar.....	24
Figura 2.2 – Passo do enrolamento e passo polar.	25
Figura 2.3 – Enrolamento concentrado.....	28
Figura 2.4 – Enrolamento distribuído.	29
Figura 2.5 – Enrolamento concêntrico.	30
Figura 2.6 – Enrolamento imbricado	30
Figura 2.7 – Enrolamento ondulado.....	31
Figura 2.8 – Enrolamento camada única.	32
Figura 2.9 – Enrolamento camada dupla.	32
Figura 2.10 – Enrolamento por pólos.....	33
Figura 2.11 – Enrolamento por pólos consecuentes.	34
Figura 2.12 – Enrolamento por pólos ligado em série.	35
Figura 2.13 – Enrolamento por pólos consecuentes ligado em série.....	35
Figura 2.14 – Enrolamento por pólos ligado em paralelo.	35
Figura 2.15 – Enrolamento por pólos consecuentes ligado em paralelo.....	35
Figura 2.16 – Máquina primária.	37
Figura 2.17 – FEM induzida num enrolamento distribuído.	38
Figura 2.18 – Forma de onda da FEM induzida num enrolamento distribuído.	40
Figura 2.19 – Bobina com passo encurtado.....	41
Figura 2.20 – Tensão instantânea numa bobina de passo encurtado.	41
Figura 2.21 – Efeito do passo encurtado nas tensões harmônicas geradas.	43
Figura 3.1 – Esquema de ligação e onda de indução no entreferro por fase e trifásico para o enrolamento Dahlander na configuração de 4 pólos.	48
Figura 3.2 - Esquema de ligação e onda de indução no entreferro por fase e trifásico para o enrolamento Dahlander na configuração de 8 pólos.	49
Figura 3.3 – Conexão para conjugado constante.	50
Figura 3.4 – Conexão para potência constante.	52

Figura 3.5 – Conexão para conjugado variável.	54
Figura 4.1 – Princípio de operação do PAM.	62
Figura 4.2 - Eliminação da onda modulada de 6 pólos.	65
Figura 4.3 - Passagem por zero da onda de modulação coincide com a passagem por zero da onda principal.	68
Figura 4.4 - Passagem por zero da onda de modulação não coincide com a passagem por zero da onda principal.	69
Figura 4.5 - Princípio de funcionamento do enrolamento tipo I.	71
Figura 4.6 - Onda de indução no entreferro por fase e trifásico para o enrolamento tipo I na configuração 8 pólos.	72
Figura 4.7 - Onda de indução no entreferro por fase e trifásico para o enrolamento tipo I na configuração 10 pólos.	74
Figura 4.8 – Ligação da primeira polaridade em estrela.	75
Figura 4.9 – Ligação da segunda polaridade em estrela.	75
Figura 4.10 – Ligação da primeira polaridade em estrela.	75
Figura 4.11 – Ligação da segunda polaridade em delta.	75
Figura 4.12 - Diagrama de Goerges para configuração 8 pólos para enrolamento tipo I.	76
Figura 4.13 - Diagrama de Goerges para configuração 10 pólos para enrolamento tipo I.	76
Figura 4.14 - Onda de indução no entreferro por fase e trifásico para o enrolamento tipo II na configuração 8 pólos.	78
Figura 4.15 - Princípio de funcionamento do enrolamento tipo II.	79
Figura 4.16 - Diagrama de Goerges para configuração 8 pólos para enrolamento tipo II.	80
Figura 4.17 - Diagrama de Goerges para configuração 10 pólos para enrolamento tipo II.	80
Figura 4.18 - Onda de indução no entreferro por fase e trifásico para o enrolamento tipo II na configuração 10 pólos.	81
Figura 5.1 - Desenho do estator e rotor dos protótipos.	84
Figura 5.2 - Estator após extração do enrolamento de 6 pólos.	84
Figura 5.3 - Esquema de bobinagem e ligação para o enrolamento PAM tipo I em 8 pólos.	86

Figura 5.4 - Esquema de bobinagem e ligação para o enrolamento PAM tipo I em 10 pólos.....	87
Figura 5.5 - Esquema de bobinagem e ligação para o enrolamento PAM tipo II em 8 pólos.....	87
Figura 5.6 - Esquema de bobinagem e ligação para o enrolamento PAM tipo II em 10 pólos.....	88
Figura 5.7 - Fios de coloração diferente para facilitar a identificação.	89
Figura 5.8 - Ligações das bobinas sendo realizadas na fábrica.	89
Figura 5.9 – Estator bobinado.	89
Figura 5.10 – Protótipo acoplado ao dinamômetro.	90
Figura 5.11 – Bancada de aquisição de dados.	90
Figura 6.1- Diagrama de conexão da chave de mudança de velocidade.	94
Figura 6.2 - Curva de torque resistente em função da rotação para cargas parabólicas.....	95
Figura 6.3 - Curvas típicas de potência consumida por ventiladores.	96
Figura 7.1 – Plano de bobinagem.	104
Figura 7.2 – Polígono de Goerges para o caso exemplo.	104
Figura 7.3 – Plano de bobinagem da fase R para o enrolamento PAM tipo I em 8 pólos.....	109
Figura 7.4 - Polígono de Goerges para o enrolamento PAM Tipo I em 8 pólos.	109
Figura 7.5 - Plano de bobinagem da fase R para o enrolamento PAM tipo I em 10 pólos.	111
Figura 7.6 - Polígono de Goerges para o enrolamento PAM Tipo I em 10 pólos	112
Figura 7.7 - Plano de bobinagem da fase R para o enrolamento PAM tipo II em 10 pólos.....	114
Figura 7.8 - Polígono de Goerges para o enrolamento PAM Tipo II em 10 pólos	115
Figura 7.9 – Relatório de ensaio de performance do enrolamento PAM Tipo I na configuração de 8 pólos.....	119
Figura 7.10 – Relatório de ensaio de performance do enrolamento PAM Tipo I na configuração de 10 pólos.....	120
Figura 7.11 – Relatório de ensaio de ruído do enrolamento PAM Tipo I na configuração de 8 pólos.....	121

Figura 7.12 – Relatório de ensaio de ruído do enrolamento PAM Tipo I na configuração de 10 pólos.....	122
Figura 7.13 – Relatório de ensaio de vibração do enrolamento PAM Tipo I na configuração de 8 pólos.....	123
Figura 7.14 – Relatório de ensaio de vibração do enrolamento PAM Tipo I na configuração de 10 pólos.....	124
Figura 7.15 – Relatório de ensaio de performance do enrolamento PAM Tipo II na configuração de 8 pólos.....	126
Figura 7.16 – Relatório de ensaio de performance do enrolamento PAM Tipo II na configuração de 10 pólos.....	127
Figura 7.17 – Relatório de ensaio de ruído do enrolamento PAM Tipo II na configuração de 8 pólos.....	128
Figura 7.18 – Relatório de ensaio de ruído do enrolamento PAM Tipo II na configuração de 10 pólos.....	129
Figura 7.19 – Relatório de ensaio de vibração do enrolamento PAM Tipo II na configuração de 8 pólos.....	130
Figura 7.20 – Relatório de ensaio de vibração do enrolamento PAM Tipo II na configuração de 10 pólos.....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo do número de pólos resultantes da modulação.	67
Tabela 2 - Dados nominais dos protótipos PAM.	85
Tabela 3 - Comparativo resumido dos ensaios.	91
Tabela 4 – Comparativo de material ativo.	98
Tabela 5 – Comparativo de custos.....	98
Tabela 6 – Tabela resumo.	99

LISTA DE ABREVIATURAS

PAM *Pole Amplitude Modulation*

FEM *Força Eletromotriz*

LISTA DE SÍMBOLOS

b_u	: Onda de indução no entreferro devido aos enrolamentos da fase U	
B_u	: Valor máximo da onda de indução no entreferro devido aos enrolamentos da fase U	
\vec{B}	: Vetor indução magnética	[Wb/m ²]
C_{max}/C_n	: Conjugado máximo	[p.u.]
C_p/C_n	: Conjugado de partida	[p.u.]
$\cos j_b$: Fator de potência do motor na baixa velocidade	
$\cos j_a$: Fator de potência do motor na alta velocidade	
$DT. Bobina$: Elevação de temperatura da bobina	[K]
d_1	: Número de camadas do enrolamento do estator	
e	: Força Eletromotriz	
f_1	: Frequência da rede de alimentação	[Hz]
gc_1	: Grupo de condutores alimentados pela mesma corrente do estator	
I	: Corrente nos condutores do motor	[A]
i_n	: Escalar unitário que indica o sentido da corrente da fase na ranhura n	
I_p/I_n	: Corrente de partida	[p.u.]
k_d	: Fator de distribuição do enrolamento	
k_e	: Fator de enrolamento	
k_p	: Fator de passo do enrolamento	
l	: Comprimento do condutor imerso no campo	[m]
m_1	: Número de fases do estator	
$N (\%)$: Rendimento percentual do motor	
n	: Rotação de operação do motor de indução	[rpm]

nL_1	: Número de ligações (caminhos paralelos) no estator	
N_p	: Número de ranhuras da região de simetria	
N_s	: Número de ranhuras do enrolamento base	
n_s	: Rotação síncrona	[rpm]
N_1	: Número de ranhuras do estator	
P_a	: Potência do motor na alta velocidade	[W]
P_b	: Potência do motor na baixa velocidade	[W]
$P_{fe} (W)$: Perdas no ferro	[W]
p_m	: Número de pares de pólos da onda de modulação	
p_1	: Número de pares de pólos	
q_1	: Número de ranhuras por pólo por fase do estator	
R	: Distância do condutor ao centro de giro	[m]
RPM	: Rotação do motor por minuto	
R_x	: Raios do polígono de Goerges	
S	: Regiões de simetria do enrolamento	
s	: escorregamento	
W_1	: Número de condutores em série por fase do estator	
W	: Número de espiras da fase	
t	: Tempo	[s]
T_n	: Terminal n	
U_{If}	: Tensão eficaz de fase aplicado ao enrolamento	[V]
U_f	: Tensão de alimentação de fase	[V]
U_L	: Tensão de alimentação de linha	[V]

x_1	: Sistema de coordenadas em repouso no estator	
Z_1	: Número de espiras por bobina do estator	
a	: Deslocamento das três ondas de modulação na circunferência do estator	
b_1	: Faixa de zona do enrolamento do estator	
s_d	: Fator de dispersão harmônica	
x	: Fator de enrolamento do campo da fundamental	
f	: Fluxo total de um pólo	[Wb]
f_m	: Fluxo máximo de um pólo	[Wb]
h_b	: Rendimento do motor na baixa velocidade	
h_a	: Rendimento do motor na alta velocidade	
w	: Velocidade angular	[rad/s]
t_{p1}	: Passo polar	
t_{s1}	: Passo do enrolamento do estator	
\vec{v}	: Vetor velocidade relativa do condutor imerso em um campo magnético	[m/s]
$2p_1$: Número de pólos	

RESUMO

O presente trabalho aborda o estudo sobre enrolamentos para máquinas elétricas girantes, com foco no princípio da modulação dos pólos de um enrolamento, mais conhecido na indústria como PAM (*Pole Amplitude Modulation*).

O estudo é dividido em partes, destacando-se: apresentação dos conceitos de enrolamentos para máquinas elétricas girantes, visando definir algumas nomenclaturas e equações na área de bobinagem; a variação de velocidade de uma máquina de indução através de comutações no(s) enrolamento(s), dando uma ênfase maior ao estudo do PAM.

O trabalho procura compreender a física de se obter duas polaridades com um único enrolamento. Para validar o estudo, foram construídos dois protótipos, cada um utilizando uma configuração do enrolamento PAM. Os protótipos têm como objetivos: verificar a dupla polaridade; comparar a performance entre as duas configurações de PAM; e comparar com outros métodos de variação de velocidade.

Os resultados obtidos comprovaram a aplicabilidade do PAM, comutando de uma polaridade para outra apenas alterando as conexões nos terminais do motor. Foi realizada uma comparação econômica do PAM com outras formas de variação de velocidade, onde o PAM se mostrou uma alternativa viável para cargas parabólicas que necessitam de variação de velocidade.

ABSTRACT

This dissertation describes the theory of Pole Amplitude Modulation, commonly known in the industry as PAM. This concept is applied to windings of electrical rotating machines.

The study is divided into subjects, such as: basic concepts and definitions of windings, and speed change of induction machines by switching the leads connections, with special importance to the PAM winding.

The main objective of this study is to understand the feasibility of obtaining two polarities at one single winding.

In order to validate the theory, two prototypes were manufactured, each one using one configuration of PAM. The experiments intend to verify the double speed and to compare the performance of the two presented configurations of PAM.

The obtained results were satisfactory, with the prototypes presenting the double speed by simply switching the leads connections.

An economical evaluation was made comparing the PAM to other methods of speed variation, where PAM is presented as a feasible alternative for parabolic loads which needs speed variation.

1 INTRODUÇÃO

Apresenta-se na Indústria uma grande variedade de máquinas e equipamentos que utilizam a energia mecânica disponibilizada nos eixos dos motores elétricos. Estas máquinas e equipamentos, do ponto de vista do motor elétrico, são chamadas de *cargas*.

A função primária dos motores elétricos é fornecer o torque requisitado pela carga na velocidade de operação pré-definida. Estima-se que mais de 40% de toda energia elétrica consumida no país é destinada ao acionamento de motores elétricos em geral. No setor industrial, pouco mais da metade da energia elétrica é consumida por motores. Os motores de indução trifásicos e monofásicos respondem por mais de 95% do total de motores instalados [1].

As cargas podem operar em velocidades constantes, ou necessitar da variação da velocidade para uma melhor operação.

A velocidade de um motor de indução depende, basicamente, do número de pólos do enrolamento e da frequência da tensão senoidal que alimenta o seu estator. Se a alimentação do motor é feita diretamente da rede elétrica, esta possui uma frequência constante, 60 Hz ou 50 Hz. Nesta condição, só resta selecionar o número de pólos da máquina, que é definido pelo enrolamento da mesma.

Grande parte dos enrolamentos das máquinas só fornece uma determinada polaridade. Existem enrolamentos especiais que através de mudanças nas ligações dos enrolamentos, conseguem fornecer mais de uma polaridade.

Este trabalho pretende aprofundar o estudo de um tipo de enrolamento que utiliza a teoria da modulação dos pólos para obter duas polaridades com uma única bobinagem.

Com o intuito de facilitar a compreensão, a introdução está dividida em duas partes: objetivo da dissertação e estrutura do documento.

1.1 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

O objetivo desta dissertação é realizar um estudo aprofundado sobre a teoria da modulação de pólos, também conhecida como *PAM*.

Com esta técnica é possível obter duas polaridades com um único enrolamento, permitindo uma variação de velocidade.

A teoria da modulação dos pólos foi desenvolvida em 1958 pelo Prof. Rawcliffe, e alguns trabalhos foram desenvolvidos nas duas décadas seguintes com o objetivo de conhecer as limitações desta técnica. No entanto, com a popularização dos inversores de frequência nos últimos anos, poucos trabalhos foram feitos nesta área, como opção para variação de velocidade. Foi encontrado apenas um fabricante de motores elétricos que produz motores PAM, a TECO-Westinghouse [2], que domina esta tecnologia desde 1968. No Brasil, não foi encontrado nenhuma empresa que produz motor com este tipo de enrolamento.

Neste trabalho procura-se compreender a teoria da modulação dos pólos, verificando, de forma didática, como ocorre a mudança de polaridade no entreferro da máquina. Além disso, são apresentadas duas formas de se obter a modulação dos pólos. Não é objetivo deste trabalho realizar simulações analíticas ou numéricas para determinar os dados de performance do motor com enrolamento PAM. Dois protótipos foram realizados para comprovar a teoria da modulação dos pólos, mostrando a rotação em duas velocidades. Eles serviram também para comparar as duas formas de se obter a modulação, e verificar qual é a melhor opção.

Como se trata de uma dissertação de mestrado profissional, foi feito um estudo para verificar em que tipo de aplicação o PAM apresenta seu maior benefício; além de fazer um comparativo econômico com os outros métodos de variação de velocidade.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em sete capítulos, procurando facilitar a compreensão com uma divisão clara dos assuntos abordados.

No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica, abordando algumas definições e conceitos de enrolamentos e força eletromotriz. Aqui são apresentados aspectos dos enrolamentos importantes para a compreensão de máquinas elétricas.

O capítulo 3 apresenta os métodos de variação de velocidade em motores de indução. É dissertado sobre enrolamentos Dahlander, e brevemente sobre inversores de frequência e enrolamentos independentes.

O capítulo 4, ainda no âmbito da variação de velocidade, apresenta a teoria da modulação dos pólos, o equacionamento da onda de indução gerada no entreferro, critérios para que a modulação ocorra corretamente, e duas formas de se obter a modulação dos pólos.

Dois protótipos foram fabricados com o objetivo de comprovar a teoria da modulação dos pólos e identificar as dificuldades de fabricação de tal tipo de enrolamento. Os resultados dos ensaios feitos nos protótipos estão apresentados no capítulo 5.

No capítulo 6 é feito um estudo sobre a aplicação do PAM na indústria. Aqui é realizado um estudo econômico do PAM com outros métodos de variação de velocidade.

No capítulo 7 são estabelecidas as conclusões da dissertação e propostas as oportunidades para continuidade do projeto.

2 CONCEITOS BÁSICOS DE ENROLAMENTOS PARA MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES

2.1 INTRODUÇÃO

No projeto de uma máquina elétrica, o enrolamento se caracteriza como um importante elemento, pois ele influencia importantes características da máquina como polaridade, fluxo e impedância.

Realizar um enrolamento significa dispor as bobinas de diversas fases nas ranhuras, estabelecendo as direções das correntes nos dois ramos das bobinas, realizar as conexões das fases e entre as fases e determinar o número de espiras e o tamanho do condutor.

Este capítulo trata dos conceitos básicos dos enrolamentos de máquinas elétricas trifásicas de polaridade única. Os enrolamentos de múltiplas polaridades serão tratados nos capítulos seguintes com mais detalhes.

2.2 CONCEITOS

Para um bom entendimento dos enrolamentos, primeiramente é importante conhecer algumas definições e conceitos bastante utilizados. Estes conceitos são apresentados nas referências [7], [8], [9] e [10].

2.2.1 Terminologia da Bobina

- **Espira:** é uma volta de um condutor. Este condutor pode ser composto por um único fio ou por mais de um fio em paralelo. Quando a seção do condutor

torna-se muito grande, para reduzir o efeito pelicular e devido à dificuldade de se moldar uma seção muito grande de condutor, são utilizados mais de um fio em paralelo.

- **Bobina:** é um grupo de espiras que se alojará numa ranhura. O número de espiras depende da tensão e da potência da máquina.
- **Grupo de Bobinas:** É o conjunto de uma ou mais bobinas, que forma um pólo. O número de bobinas por grupo depende do número de ranhuras do estator, da polaridade do motor e do número de camadas do enrolamento.
- **Fase:** É o conjunto de grupo de bobinas que irão completar uma fase. A quantidade de grupos de bobinas por fase depende do número de pólos e da ligação dos grupos.
- **Enrolamento:** É o conjunto total de fases para um motor, ou seja, todos os grupos de bobina que compõem o bobinado de um motor.

2.2.2 Passo Polar (t_{p1})

Passo Polar, também denominado Passo Pleno ou Passo Diametral, é a distância em número de ranhuras, compreendido por dois pólos consecutivos.

$$t_{p1} = \frac{N_1}{2p_1} \quad (1)$$

Onde:

- N_1 : número de ranhuras do estator
- $2p_1$: número de pares pólos

O passo polar informa quantas ranhuras estão dispostas sob cada pólo.

A Figura 2.1 mostra a definição de passo polar para $2p_1 = 2$.

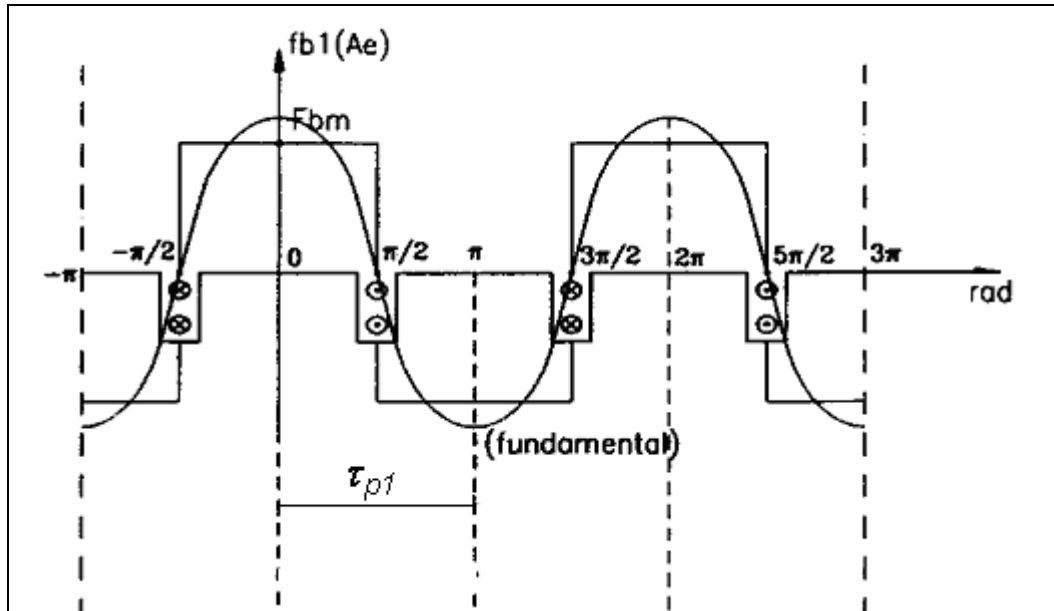


Figura 2.1 – Passo Polar.

Por exemplo, um motor de 4 pólos com 48 ranhuras no estator tem $t_{p1} = \frac{48}{4} = 12$, o que significa que uma bobina que tem o seu primeiro ramo saindo na ranhura 1, tem seu segundo ramo entrando na ranhura 13.

2.2.3 Número de Ranhuras por Pólo e Fase (q_1)

O número de ranhuras por pólo e fase é calculado da seguinte forma:

$$q_1 = \frac{N_1}{2p_1 \cdot m_1} \quad (2)$$

Onde:

m_1 : Número de fases. No caso trifásico, $m_1 = 3$.

Para $q_1 = \text{INTEIRO}$, o enrolamento é definido como de ranhuras inteiras. Para $q_1 = \text{FRACIONARIO}$, o enrolamento é definido como de ranhuras fracionárias. Para o caso de q_1 fracionário, deve-se representar pela menor fração.

$$q_1 = \frac{N_1}{2p_1 \cdot m_1} = a_1 \frac{b_1}{c_1} \Rightarrow \text{representação } \frac{b_1}{c_1} \quad (3)$$

2.2.4 Passo do Enrolamento (t_{s1})

Passo do enrolamento é a distância, em graus elétricos, entre a inversão de corrente em condutores de mesma fase.

Na Figura 2.2 tem-se a ilustração do passo do enrolamento t_{s1} e do passo polar t_{p1} para um estator com $N_1 = 48$ e $2p_1 = 4$.

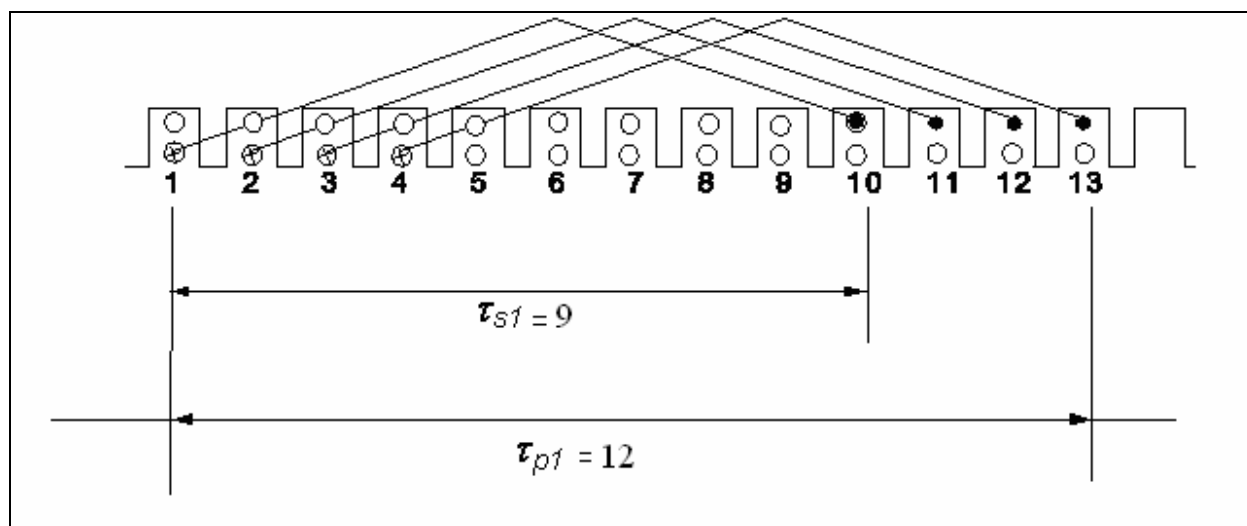


Figura 2.2 – Passo do enrolamento e passo polar.

No caso da Figura 2.2, o passo do enrolamento é menor do que o passo polar. Toda vez que esta situação ocorre diz-se que o enrolamento tem *passo encurtado*. Quase a totalidade dos enrolamentos trifásicos possui passo de enrolamento encurtado, pois esta é uma maneira de se atenuar os harmônicos de campo gerados pelo enrolamento, o que será melhor explicado ainda neste capítulo.

No caso da Figura 2.2, o enrolamento possui passo de 9 ranhuras, assim a bobina que possui um ramo na ranhura 1 terá seu segundo ramo na ranhura 10, conforme mostrado na Figura 2.2. Geralmente o passo do enrolamento é indicado da seguinte forma:

(ramo inicial da bobina : ramo final da bobina)

neste caso, a indicação seria (1:10).

Existem casos onde o passo do enrolamento não coincide com o passo da bobina. No entanto são exceções e não serão abordados aqui.

O ângulo elétrico ocupado por uma ranhura pode ser dado por:

$$\Delta_1 = \frac{2p \cdot p_1}{N_1} = \frac{p}{\frac{N_1}{2p_1}} = \frac{p}{t_{p_1}} \quad (4)$$

Logo $t_{p_1} = m_1 \cdot q_1$

2.2.5 Regiões de Simetria (S)

Regiões de simetria são também conhecidas por *Enrolamentos Base* ou *Ciclos*. Quando um enrolamento possui mais de uma região de simetria, é possível encontrar uma periodicidade na disposição do enrolamento nas ranhuras.

Para enrolamentos com dupla camada, é possível calcular o número de regiões de simetria através da seguinte fórmula:

$$S = m.d.c.(N_1, p_1) \quad (5)$$

Onde *m.d.c.* significa máximo divisor comum.

Para enrolamentos de camada única, o número de regiões de simetria é dado por:

$$S = m.d.c.\left(\frac{N_1}{2}, p_1\right) \quad (6)$$

Outro conceito importante é o de enrolamento base, cujo número de ranhuras é determinado a partir do número de ranhuras do estator e do número de regiões de simetria pela seguinte equação:

$$N_s = \frac{N_1}{S} \quad (7)$$

2.2.6 Condições de Simetria

Um enrolamento pode ser considerado simétrico quando as tensões induzidas nele, por um campo girante são também simétricas, ou seja, a tensão induzida em cada fase deverá ter a mesma amplitude e estar defasada da outra de $\frac{2p}{m_1}$ radianos.

Serão estabelecidas, a seguir, algumas condições de verificação da simetria de enrolamentos, para combinações de número de pólos, fases e ranhuras.

2.2.6.1 Enrolamentos com q inteiro

A primeira condição de simetria é satisfeita quando:

- Camada única:

$$\frac{N_1}{2 \cdot m_1} = P_1 \cdot q_1 \text{ for inteiro} \quad (8)$$

- Camada dupla:

$$\frac{N_1}{m_1} = 2 \cdot P_1 \cdot q_1 \text{ for inteiro} \quad (9)$$

A segunda condição de simetria é satisfeita quando:

$$\frac{N_1}{S \cdot m_1} \text{ for inteiro} \quad (10)$$

2.2.6.2 Enrolamentos com q_1 fracionário

A primeira condição de simetria é satisfeita quando:

- Camada única:

$$\frac{P_1}{c_1} \text{ for inteiro} \quad (11)$$

- Camada dupla:

$$\frac{2 \cdot P_1}{c_1} \text{ for inteiro} \quad (12)$$

A segunda condição de simetria é satisfeita quando:

$$\frac{c_1}{m_1} \text{ não for inteiro} \quad (13)$$

Onde c_1 é o denominador da fração de q .

Se $\frac{N_s}{m_1}$ for par, pode-se construir um enrolamento com uma ou duas camadas,

se for ímpar, somente dupla camada. As condições de simetria permitem avaliar a viabilidade de construção do esquema de bobinagem, através da análise de seus dados básicos.

2.2.7 Tipos de Enrolamentos

Os tipos de enrolamentos podem ser definidos quanto ao:

- Número de bobinas por grupo;
- Ligação dos condutores;
- Número de camadas;
- Ligação de grupos de bobinas;
- Caminho de corrente de um enrolamento.

2.2.7.1 Número de Bobinas por Grupo

Quanto ao número de bobinas por grupo, o enrolamento pode ser:

- Concentrado ($q_1 = 1$)
- Distribuído ($q_1 > 1$)

O enrolamento concentrado é composto de grupos de bobinas, que por sua vez são compostas apenas por uma bobina, conforme Figura 2.3.

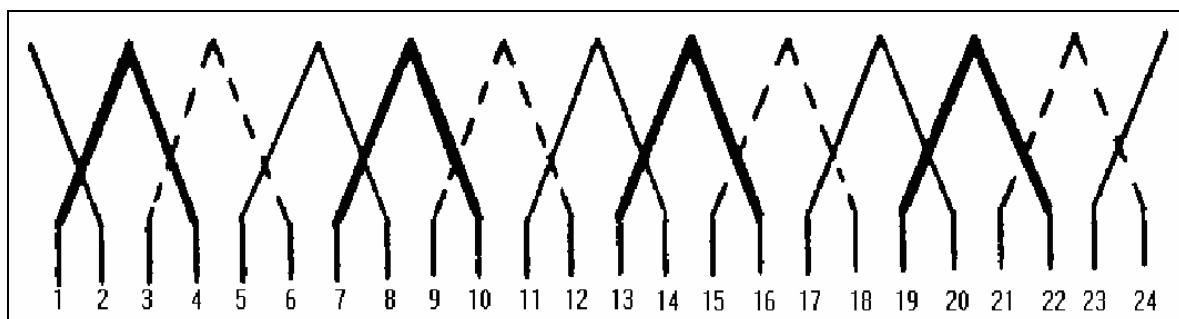


Figura 2.3 – Enrolamento concentrado.

O enrolamento distribuído é composto de grupos de bobinas, onde cada grupo de bobinas é composto por duas ou mais bobinas, conforme Figura 2.4.

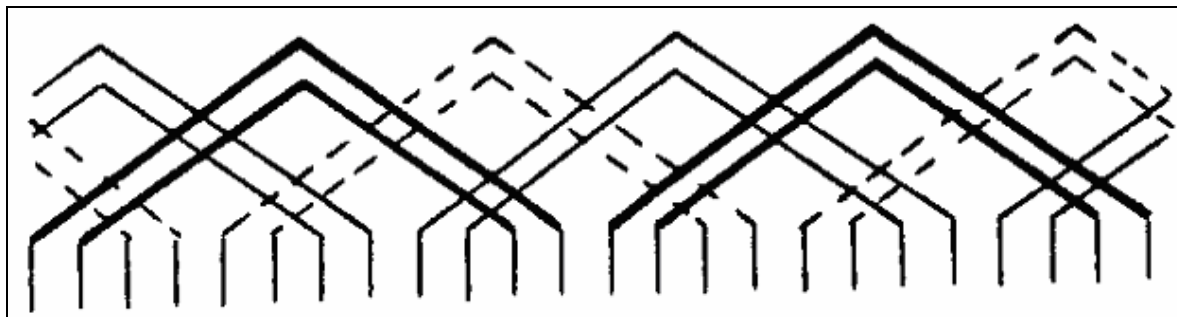


Figura 2.4 – Enrolamento distribuído.

Os enrolamentos, em geral, são do tipo distribuído, onde o número de ampère-espiras necessários por par de pólos não está concentrado numa única bobina, mas sim distribuído entre as diversas bobinas conectadas em série e arranjadas em q_1 ranhuras adjacentes.

Quando o enrolamento é fracionário, podem existir grupos de bobinas compostos por números diferentes de bobinas, onde, por exemplo, um grupo tem 2 bobinas e outro tem 1 bobina, o que equivale a 1,5 bobinas por grupo. Mesmo sendo constituído por grupos com diferente número de bobinas, ainda é um enrolamento distribuído.

2.2.7.2 Ligação dos Condutores

Quanto às ligações dos condutores na cabeça de bobina, o enrolamento pode ser:

- Concêntrico;
- Imbricado;
- Ondulado.

Enrolamento Concêntrico

Neste tipo de enrolamento as ligações (cabeças de bobina) de uma mesma fase não se cruzam. Para tanto, as bobinas de um mesmo grupo possuem passos diferentes, conforme Figura 2.5.

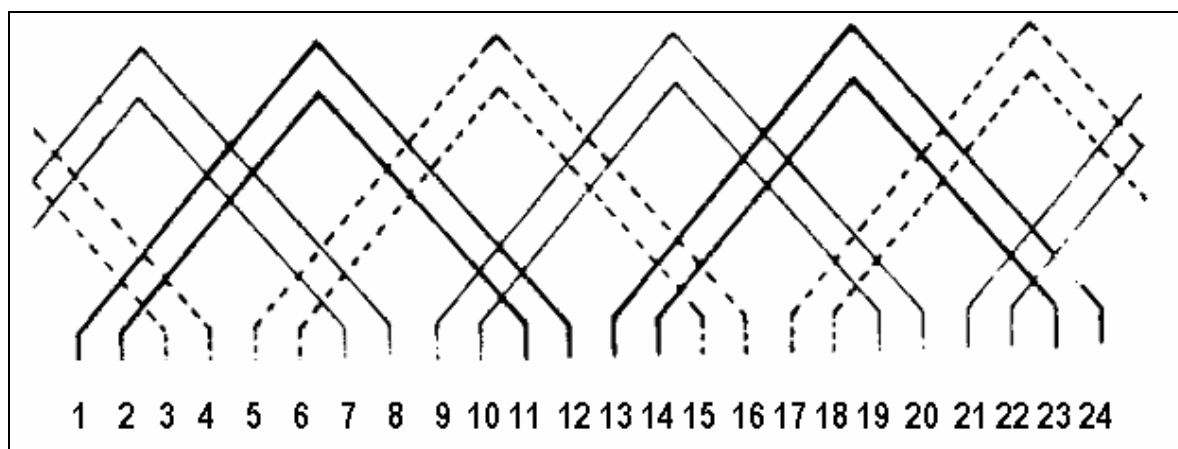


Figura 2.5 – Enrolamento concêntrico.

Neste tipo de enrolamento a indicação do passo do enrolamento usualmente é (1 : passo da menor bobina + 1 : passo da maior bobina + 1). No caso da Figura 2.5 a indicação é (1 : 10 : 12).

Enrolamento Imbricado

No enrolamento do tipo imbricado, todas as cabeças de bobina têm o mesmo tamanho, havendo o cruzamento delas entre si, conforme Figura 2.6.

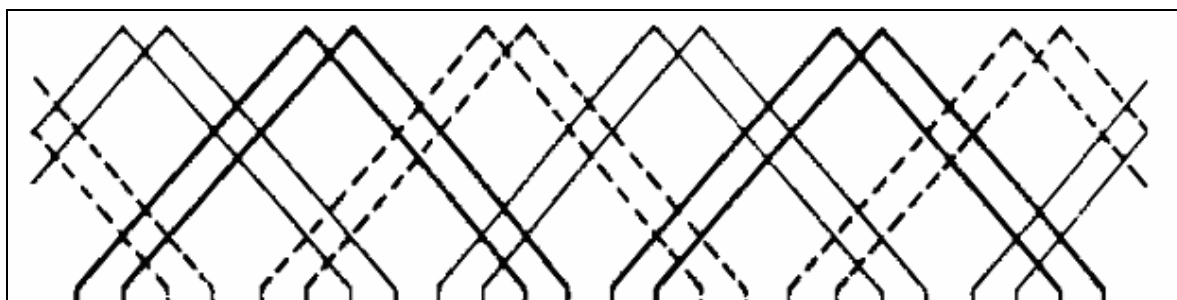


Figura 2.6 – Enrolamento imbricado

Enrolamento Ondulado

O enrolamento ondulado de corrente alternada é similar ao ondulado de corrente contínua. Ele pode ser visto na Figura 2.7.

Os enrolamentos ondulados são muito usados em estatores e rotores de máquinas com elevada intensidade de corrente.

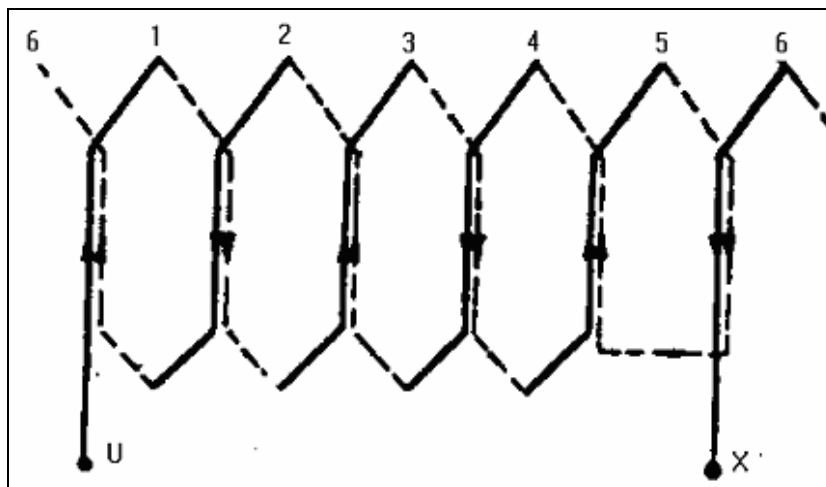


Figura 2.7 – Enrolamento ondulado.

2.2.7.3 Número de Camadas

Um enrolamento trifásico pode ser realizado com tantas camadas quanto desejado. No entanto, devido ao custo e à mão de obra, normalmente se constrói com uma ou duas camadas.

O enrolamento de uma camada é denominado de camada única ou de ranhura cheia. Geralmente o enrolamento de camada única é utilizado em estatores de motores de pequeno porte e nos rotores de motores também de pequeno porte.

Já o enrolamento de duas camadas é denominado de camada dupla ou de meia ranhura, já que há dois lados de bobina por ranhura. É bastante utilizado em máquinas de maior porte.

Nas Figura 2.8 e Figura 2.9 têm-se, respectivamente, ilustrações e esquemas simplificados do enrolamento de camada única e de dupla camada.

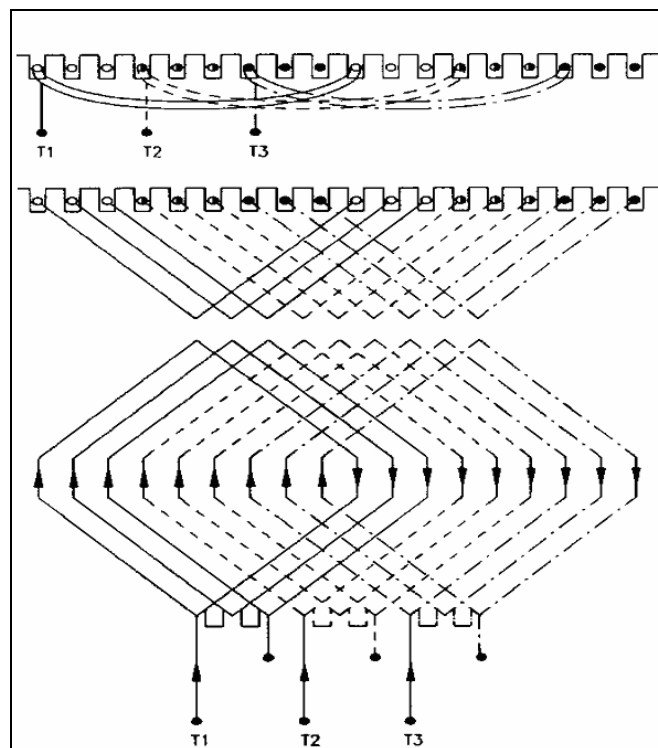


Figura 2.8 – Enrolamento camada única.

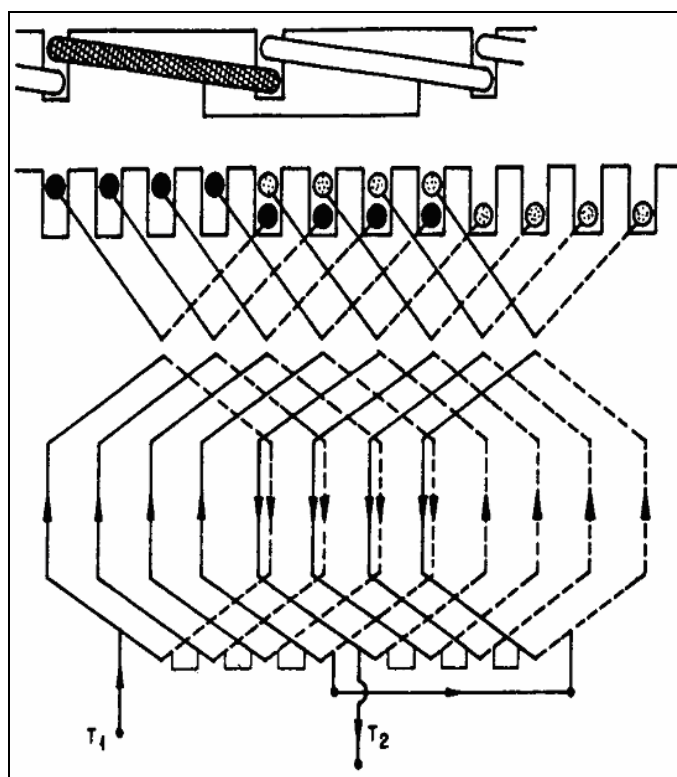


Figura 2.9 – Enrolamento camada dupla.

2.2.7.4 Ligação de Grupos de Bobinas

A ligação dos grupos de bobinas do enrolamento é muito importante para a geração da Força Eletromotriz (*FEM*).

Quanto ao tipo de ligação de grupos de bobinas, eles podem ser ligados de duas maneiras:

- por Pólos;
- por Pólos Conseqüentes.

Ligação por Pólos

Nesta conexão, o final do primeiro grupo é conectado ao o final do segundo, o início deste grupo ao início do terceiro grupo, o final deste grupo ao final do quarto grupo, e assim sucessivamente. Resumidamente, se conecta final com final, e início com início.

Com esta forma de conexão, um grupo de bobina forma um pólo, conforme Figura 2.10. Considerando uma corrente que vai de A para B, são formados 4 pólos conforme figura abaixo.

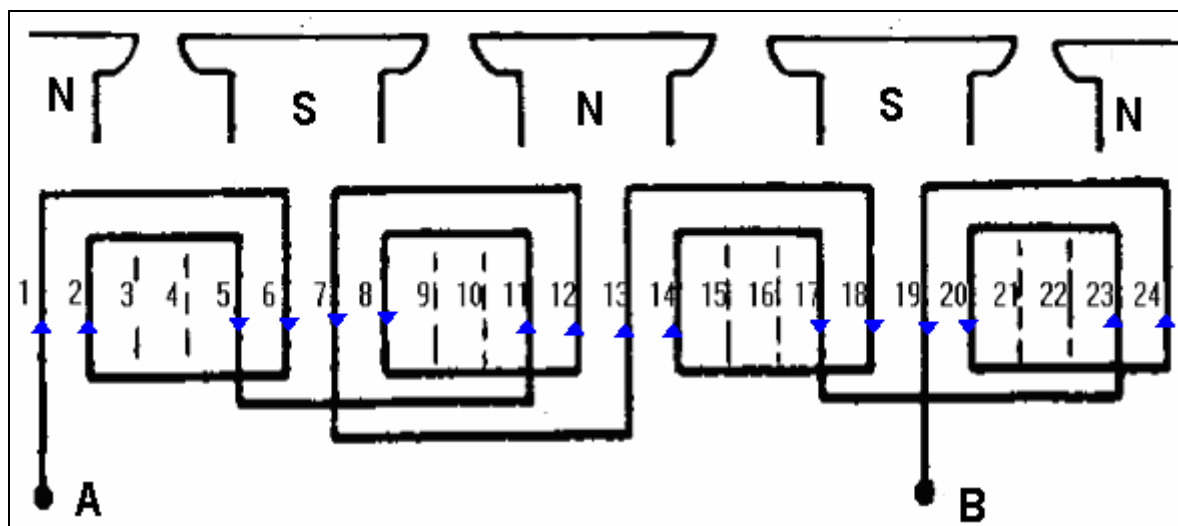


Figura 2.10 – Enrolamento por pólos.

Ligação por Pólos Conseqüentes

Nesta conexão se unirá o final do primeiro grupo ao início do segundo grupo; o final deste grupo ao início do terceiro e assim sucessivamente. Resumidamente, se conecta o final de um grupo com o início do outro grupo.

Com esta forma de conexão, um grupo de bobina forma dois pólos, conforme Figura 2.11. Considerando uma corrente que vai de A para B, são formados 8 pólos conforme figura abaixo.

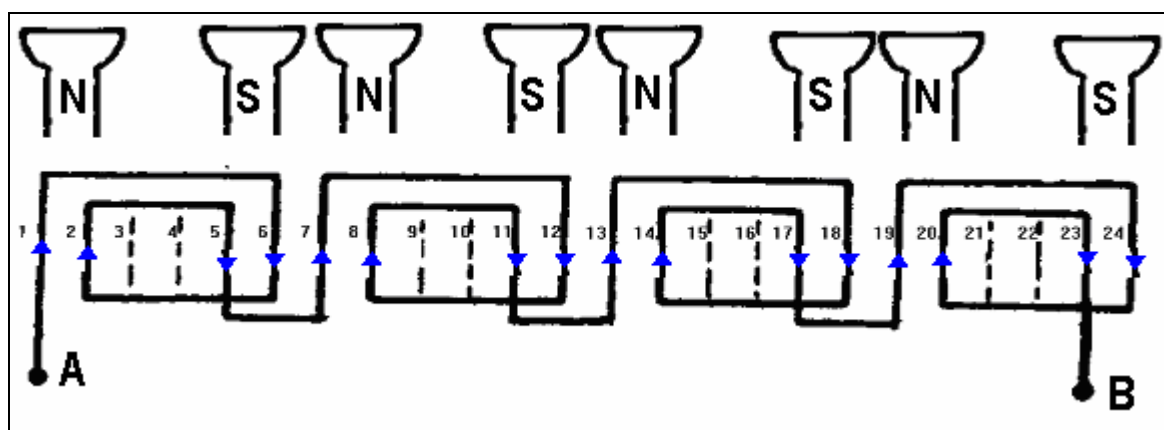


Figura 2.11 – Enrolamento por pólos conseqüentes.

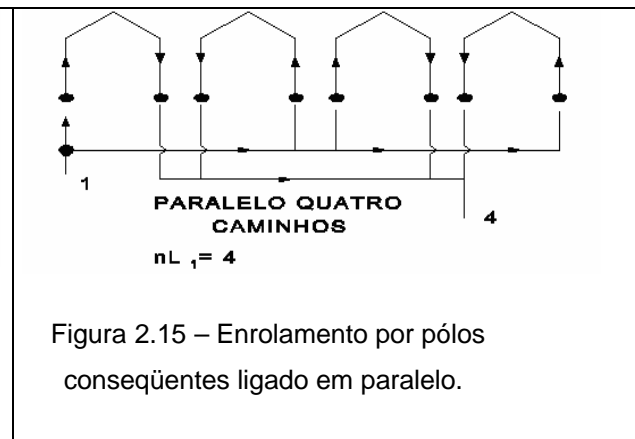
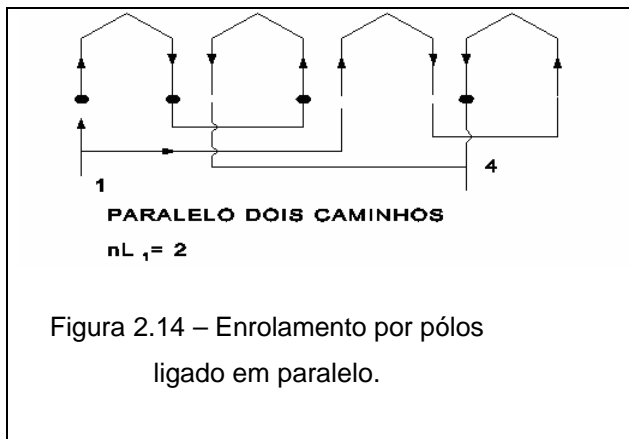
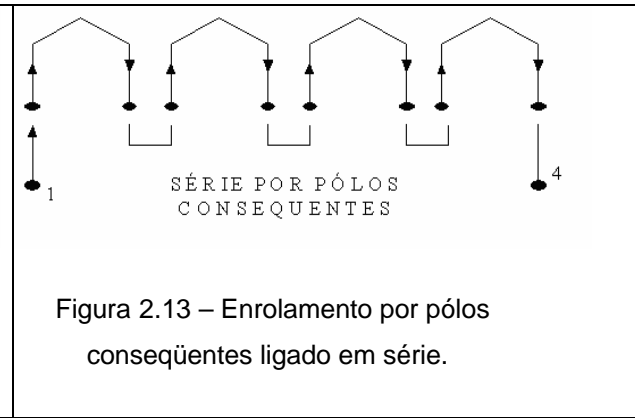
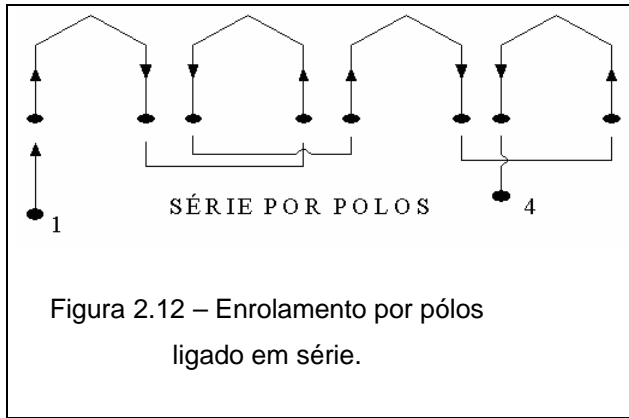
2.2.7.5 Caminhos de Corrente de um Enrolamento

Para uma determinada potência útil no eixo da máquina, é necessário um valor proporcional de fluxo magnético no entreferro da máquina.

Dependendo da tensão e do valor deste fluxo, o projetista do enrolamento tem a necessidade de adequar o número de condutores em série por fase do enrolamento para se conseguir chegar ao fluxo desejado.

Dentre os vários modos que o projetista pode utilizar, o mais significativo é projetar o enrolamento com caminhos paralelos de corrente.

Na Figura 2.12 mostra-se um enrolamento em série por pólos, e na Figura 2.13 um enrolamento em série por pólos conseqüentes. Já nas Figura 2.14 e Figura 2.15 são mostrados os mesmos enrolamentos, no entanto com 2 e 4 caminhos paralelos, respectivamente.



Ao se conectar os grupos de uma fase em paralelo ($nL_1 = 2$) o número de condutores em série por fase diminuiu à metade, isto significa que para uma mesma tensão de alimentação, o fluxo gerado pelo enrolamento dobra. Por sua vez, a seção transversal total do condutor dobra.

Aplicando-se a Lei de Faraday para a tensão gerada em uma fase do enrolamento tem-se [7]:

$$f = \frac{U_{If}}{4,44 \cdot x \cdot f_1 \cdot W_1} \quad (14)$$

Onde:

- f : fluxo total de um pólo máximo no tempo [Wb]
- U_{If} : tensão eficaz de fase aplicada ao enrolamento [V]
- f_1 : freqüência da rede de alimentação [Hz]
- x : fator de enrolamento do campo da fundamental

O termo W_1 representa o número de condutores em série por fase, é calculado por:

$$W_1 = \frac{N_1}{m_1} \cdot W \cdot \frac{d_1}{nL_1} \quad (15)$$

Onde:

- W : número de espiras por bobina.
- d_1 : número de camadas. Camada única $d_1 = 1$ e camada dupla $d_1 = 2$
- nL_1 : número de caminhos em paralelo.

Ao projetar um enrolamento com caminhos paralelos, deve-se obedecer a seguinte regra:

$$\frac{2p_1}{nL_1} = \text{INTEIRO} \quad (16)$$

Por esta regra, conclui-se que o maior número de caminhos paralelos possíveis é igual à polaridade da máquina.

2.3 FORÇA ELETROMOTRIZ EM ENROLAMENTOS DE CORRENTE ALTERNADA

A força eletromotriz (FEM) gerada por um enrolamento de corrente alternada, deve ser caracterizada de três formas:

- Amplitude
- Frequência
- Forma de onda

Geralmente, se deseja que a forma de onda da FEM seja uma senóide, pois as harmônicas de ordens superiores geram perdas adicionais e torques indesejados.

2.3.1 FEM em um condutor

Suponha que na Figura 2.16, o ímã se desloque no sentido vertical segundo um movimento harmônico de modo que o fluxo magnético visto pela bobina seja do tipo:

$$\bar{f} = \bar{f}_m \cdot \sin(\omega t) \quad (17)$$

onde

$$\omega = 2 \cdot p \cdot f \quad (18)$$

e \bar{f}_m é a amplitude do fluxo. Na equação (18) f é a frequência angular do ímã.

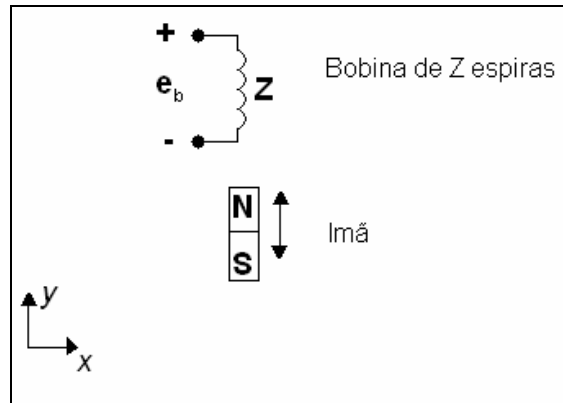


Figura 2.16 – Máquina primária.

A tensão que aparece na bobina é agora:

$$e_b = Z \cdot \frac{d\bar{f}}{dt} = \omega \cdot W \cdot \bar{f}_m \cdot \cos(\omega t) \quad (19)$$

ou

$$e_b = 2 \cdot p \cdot f \cdot W \cdot \bar{f}_m \cdot \cos(\omega t) \quad (20)$$

O valor eficaz de tensão acima fica:

$$e_b = \frac{2 \cdot p}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot W \cdot \bar{f}_m = 4,44 \cdot f \cdot W \cdot \bar{f}_m \quad (21)$$

2.3.2 FEM em um enrolamento distribuído

Seja um enrolamento distribuído, onde $t_{p1}=6$. O grupo de bobinas é composto de quatro bobinas com o passo pleno ($t_{p1}=t_{s1}, q_1=4$).

Para a fundamental de tensão, o ângulo entre duas ranhuras adjacentes e, conseqüentemente, entre duas bobinas adjacentes, conforme a equação (4), é:

$$\Delta_1 = \frac{p}{t_{p_1}} = \frac{180^\circ}{6} = 30^\circ.$$

Considerando que a bobina 1 está sob o neutro, os valores instantâneos das FEM's induzidas nas bobinas 1, 2, 3 e 4 serão:

$$e_{b1} = E_b \sin 0^\circ = 0;$$

$$e_{b2} = E_b \sin \Delta_1 = E_b \sin 30^\circ = \frac{E_b}{2};$$

$$e_{b3} = E_b \sin 2\Delta_1 = E_b \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3} \cdot E_b}{2};$$

$$e_{b4} = E_b \sin 3\Delta_1 = E_b \sin 90^\circ = E_b;$$

A Figura 2.17.a mostra os quatro vetores das tensões induzidas nas bobinas. Cada vetor está defasado de 30° dos vetores adjacentes.

Se fizermos a soma geométrica dos quatro vetores, conforme mostrado na Figura 2.17.b, obtém-se o polígono $OABCD$ cujo vetor resultante é OD , que fornece o valor efetivo da tensão induzida das quatro bobinas (E_{q1}).

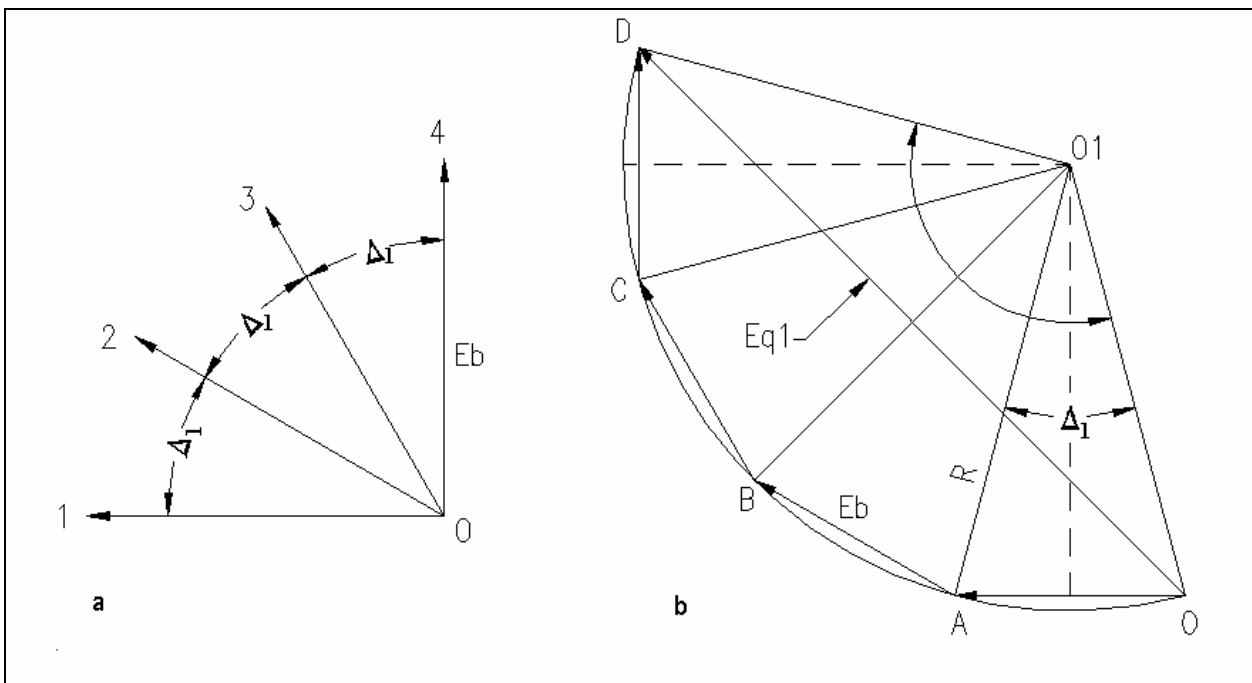


Figura 2.17 – FEM induzida num enrolamento distribuído.

A projeção do vetor resultante $E_{q1} = OD$ no eixo das ordenadas fornece o valor instantâneo da FEM induzida correspondente à posição das ranhuras 1, 2, 3 e 4. Em outros momentos, o polígono da FEM se moverá e ocupará outras posições, rotacionando com o centro em O_1 , com uma frequência angular w .

Para determinar $E_{q1} = OD$, inicialmente se calcula um dos lados do triângulo isósceles OO_1A , cujo vértice é O_1 .

$$R = \frac{E_b}{2 \cdot \sin \frac{\Delta_1}{2}} \quad (22)$$

Agora com o triângulo isósceles O_1OD , se calcula o lado OD .

$$E_{q1} = 2 \cdot R \cdot \sin \frac{q_1 \Delta_1}{2} = E_b \cdot \frac{\sin \frac{q_1 \Delta_1}{2}}{\sin \frac{\Delta_1}{2}} \quad (23)$$

Se todas as bobinas estivessem concentradas em apenas uma ranhura, a FEM gerada seria igual a $q_1 E_b$. Agora, a razão entre a FEM gerada por um enrolamento distribuído e a F.E.M. gerada por um enrolamento concentrado em uma ranhura pode ser escrito como segue.

$$k_d = \frac{E_{q1}}{q_1 \cdot E_b} = \frac{E_b \cdot \sin \frac{q_1 \Delta_1}{2}}{q_1 \cdot E_b \cdot \sin \frac{\Delta_1}{2}} = \frac{\sin \frac{q_1 \Delta_1}{2}}{q_1 \cdot \sin \frac{\Delta_1}{2}} = \frac{\sin \frac{p}{2 \cdot m_1}}{q_1 \cdot \sin \frac{p}{2 \cdot m_1 \cdot q_1}} \quad (24)$$

O fator k_d é chamado de *fator de distribuição do enrolamento*. Este fator é sempre menor do que a unidade para enrolamentos distribuídos e igual a 1 para enrolamentos concentrados. Este fator representa a atenuação da FEM fundamental devido ao fato do enrolamento estar distribuído ao longo das ranhuras do estator.

Apesar da distribuição do enrolamento reduzir a amplitude da FEM induzida, ela faz com que a forma de onda da FEM se aproxime mais de uma senóide se comparada com um enrolamento concentrado. Na Figura 2.18 mostra-se simplificada a influência da distribuição do enrolamento na forma da onda da FEM.

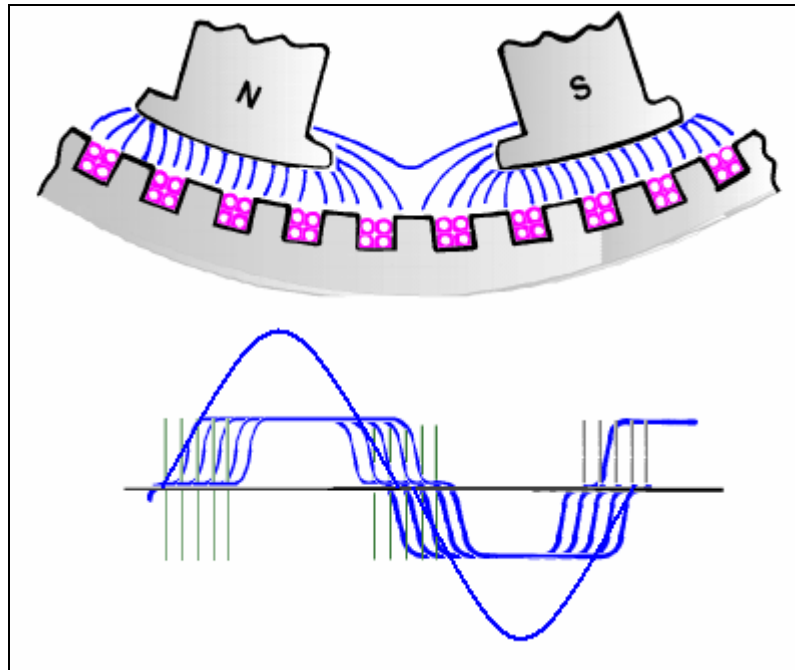


Figura 2.18 – Forma de onda da FEM induzida num enrolamento distribuído.

Quanto mais semelhante a uma senóide for a forma da onda, menor seu conteúdo harmônico. As harmônicas de ordem superior geram maiores perdas por correntes parasitas, além de poderem excitar frequências naturais do estator, gerando ruído de origem eletromagnética.

2.3.3 FEM em um enrolamento com passo encurtado

Dizer que um enrolamento possui passo encurtado significa que o passo do enrolamento (t_{sl}) é menor do que o passo polar (t_{pl}), conforme Figura 2.19. Ou seja, o espaço abrangido por uma simples bobina é menor do que o espaço polar dos 180° elétricos.

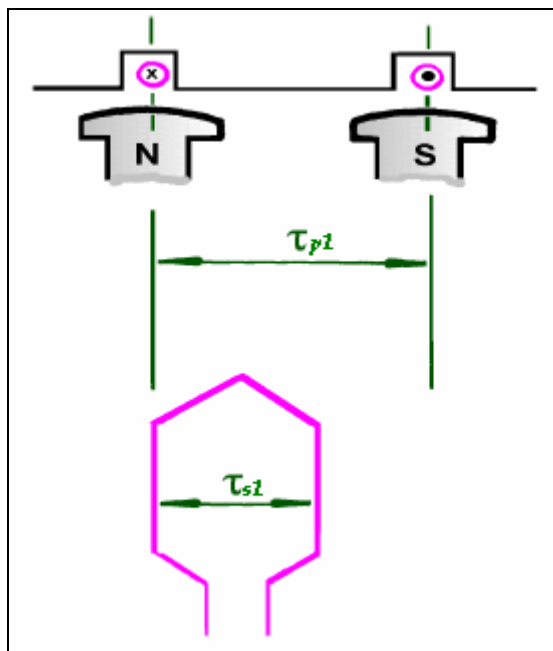


Figura 2.19 – Bobina com passo encurtado.

Seja a tensão induzida nos dois lados de uma bobina (E_1 e E_2) que estão separados de um ângulo elétrico β . As tensões instantâneas destes dois lados da bobina não estão em fase, e novamente deve-se fazer a soma fasorial, como é mostrada na Figura 2.20.

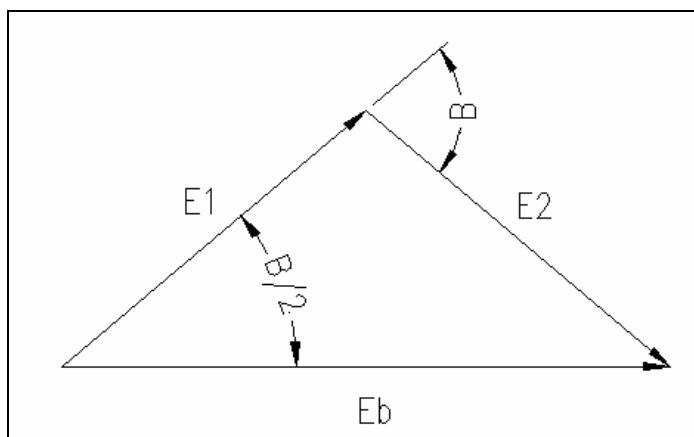


Figura 2.20 – Tensão instantânea numa bobina de passo encurtado.

Fica claro que a tensão resultante da bobina, E_b , é menor do que a soma aritmética da tensão induzida em cada lado, ou seja, $2E_1$. Uma bobina que possui passo encurtado irá induzir uma FEM menor do que uma que possua passo pleno. A razão entre a FEM de um enrolamento de passo encurtado e a FEM de um enrolamento de passo pleno resulta no *fator de passo* (k_p).

$$k_p = \frac{E_b}{2 \cdot E_1} \quad (25)$$

Considerando que as FEM's induzidas em cada lado das bobinas estão defasadas de um ângulo β , como mostra a Figura 2.20, terá o ângulo entre E_1 e a tensão resultante da bobina E_b igual a $\frac{\beta}{2}$. A tensão resultante, a partir da equação (25) e da Figura 2.20 é então:

$$E_b = 2 \cdot E_1 \cdot \cos \frac{\beta}{2} = 2 \cdot E_1 \cdot k_p \quad (26)$$

$$k_p = \cos \frac{\beta}{2} \quad (27)$$

onde β é 180° menos o ângulo elétrico abrangido pela bobina. Como β é o ângulo suplementar da extensão da bobina, o fator de passo pode também ser expresso por:

$$k_p = \sin \left(\frac{t_{s1}}{t_{p1}} \cdot \frac{p}{2} \right) \quad (28)$$

Uma redução no passo do enrolamento resulta numa cabeça de bobina mais curta, o que significa menor perda Joule nos enrolamentos do estator, e uma menor quantidade de cobre.

Da mesma forma que o passo encurtado reduz a amplitude da FEM induzida pela fundamental, ele reduz a amplitude dos harmônicos gerados pelo enrolamento.

Através da Série de Fourier, a equação da FEM instantânea pode ser aproximada por:

$$e = E_m \sin \omega t + \frac{E_m}{3} \sin 3\omega t + \frac{E_m}{5} \sin 5\omega t + \dots + \frac{E_m}{n} \sin n\omega t \quad (29)$$

Como é mostrado na Figura 2.21, se a tensão instantânea em (29) é induzida em cada lado da bobina, e se os lados das bobinas são deslocados de um ângulo β , a terceira harmônica deve ser deslocada de 3β , a quinta harmônica de 5β , e assim por diante.

Devido ao fato do encurtamento do passo reduzir a amplitude dos harmônicos gerados pelo enrolamento, a maioria dos enrolamentos de dupla camada apresenta o passo encurtado.

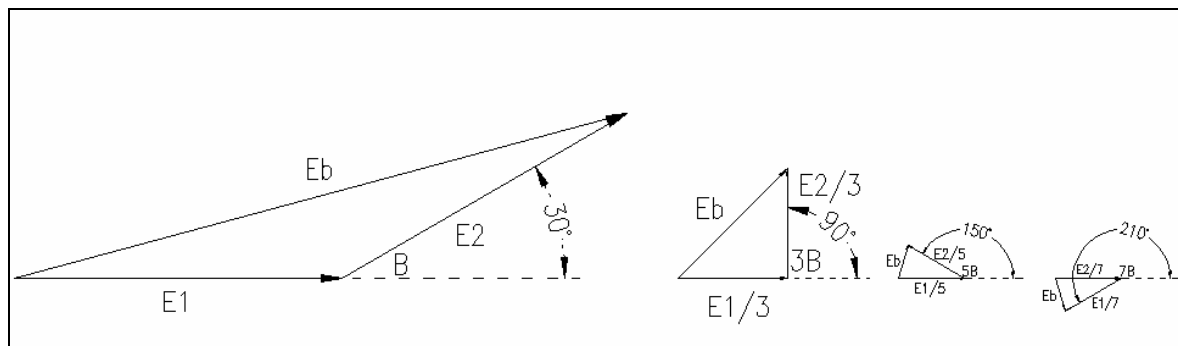


Figura 2.21 – Efeito do passo encurtado nas tensões harmônicas geradas.

2.4 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentados alguns conceitos e definições considerados importantes para o entendimento da teoria da modulação de pólos. Não serão todos os conceitos aqui apresentados abordados nos capítulos seguintes, mas todos eles são fundamentais para a compreensão dos enrolamentos de máquinas elétricas girantes.

3 MUDANÇA DE VELOCIDADE

3.1 INTRODUÇÃO

A velocidade (rotação) síncrona de uma máquina de indução é dada pela seguinte fórmula:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{2p_1} \quad (30)$$

Onde:

- n_s : velocidade síncrona [rpm]
- f : frequência de alimentação do estator [Hz]
- $2p_1$: número pares de pólos do enrolamento do estator

A segunda equação de Maxwell ($\text{div}B = 0$) indica que só é possível obter-se dipolos magnéticos, assim, as polaridades das máquinas são sempre números pares.

A velocidade de operação de uma máquina de indução varia com a carga acoplada no seu eixo. Esta variação de velocidade é chamada de escorregamento que é dado por (31). A velocidade de operação de uma máquina assíncrona é dada por (32).

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (31)$$

$$n = n_s \cdot (1 - s) \quad (32)$$

Em geral, para motores de indução de gaiola de esquilo, o escorregamento, para máquinas de pequeno porte, varia entre 1 e 5%, e para máquinas de grande

porte, de 0,2 a 1%. Portanto, não é possível obter uma variação de velocidade considerável através do escorregamento da máquina.

Analisando as equações (30) e (32), pode-se concluir que para variar a velocidade síncrona de um motor de indução, pode-se atuar de duas maneiras distintas:

- Alterando a frequência de alimentação do estator
- Alterando a polaridade do enrolamento do estator

3.2 VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA

O sistema elétrico trabalha com frequências fixas, que podem ser, por exemplo, 50 ou 60Hz. Atualmente, para se conseguir alterar a frequência de alimentação se utiliza Inversores Estáticos de Frequência, também chamados de Conversores Estáticos de Frequência. Estes inversores são dispositivos que utilizam eletrônica de potência para, através de chaveamentos, alterarem a frequência de alimentação.

Devido ao chaveamento, as formas de onda de tensão e corrente com as quais se alimenta o enrolamento do estator, possuem um conteúdo harmônico considerável.

A forma de onda de tensão apresenta altos $\frac{dV}{dt}$, o que estressa o sistema de isolamento do estator. Assim, para aumentar a robustez, a isolamento do estator é reforçada para suportar estas solicitações. Já a forma de onda da corrente, apresenta um alto conteúdo harmônico, o que gera perdas adicionais, sendo necessário muitas vezes o uso de filtros na saída do inversor ou sobredimensionar termicamente o motor.

Além disso, quanto maior o nível da tensão a ser processada, mais caras ficam as chaves estáticas que compõem o inversor. Para tensões até 690V, o preço dos inversores é da mesma ordem do preço do motor; e para tensões acima de 2300V, o preço dos inversores é superior ao preço do motor a ser acionado.

3.3 ALTERAÇÃO DA POLARIDADE

Se a alimentação for feita diretamente da rede, ou através de algum dispositivo que não altere a frequência de alimentação, a velocidade do motor, desprezando o escorregamento, dependerá do número de pólos do enrolamento do estator. A mudança da polaridade do enrolamento do estator pode ser feita das seguintes formas:

- Enrolamento Dahlander
- Enrolamentos Independentes
- Enrolamento PAM

Neste capítulo, serão apresentados brevemente os enrolamentos Dahlander e Independentes. No capítulo 4, será dissertado mais profundamente sobre o enrolamento PAM.

3.3.1 Enrolamento Dahlander

O enrolamento Lindstrom-Dahlander, ou simplesmente, Dahlander, é o enrolamento mais utilizado atualmente para se obter dupla polaridade. É o enrolamento de dupla polaridade de mais simples construção.

Alterando a forma de conectar os grupos de bobinas de cada fase, é possível obter polaridades com relações de 1 para 2. A Figura 3.1.a e a Figura 3.2.a representam um estator de 48 ranhuras. A Figura 3.1.a mostra o enrolamento da Fase U com os grupos de bobinas ligados por pólos. A Figura 3.1.b apresenta uma forma de onda representativa da densidade linear de corrente no estator, o que gera uma onda de indução 4 pólos no entreferro. As fases V e W estão defasadas de $+120^\circ$ e -120° , respectivamente. Somando a contribuição de cada fase, a densidade linear de corrente no estator é apresentada na Figura 3.1.c. A Figura 3.2.a mostra o mesmo enrolamento, no entanto com os grupos de bobinas da fase U ligados por pólos consecuentes, o que gera uma onda de indução no entreferro de 8 pólos no entreferro, mostrada na Figura 3.2.b. Somando a contribuição de cada fase, a onda de indução no entreferro é aquela mostrada na Figura 3.2.c.

Desta forma, alterando apenas as ligações externas, é possível obter-se um motor de quatro ou oito pólos. O mesmo pode ser obtido para outras polaridades, mas sempre respeitando a relação entre polaridade de 1 para 2.

O enrolamento de menor polaridade possui o seu passo do enrolamento encurtado em 50%, enquanto o enrolamento de maior polaridade possui passo pleno.

Em função das características de conjugado x rotação da carga, deve-se ligar as fases de diferentes modos.

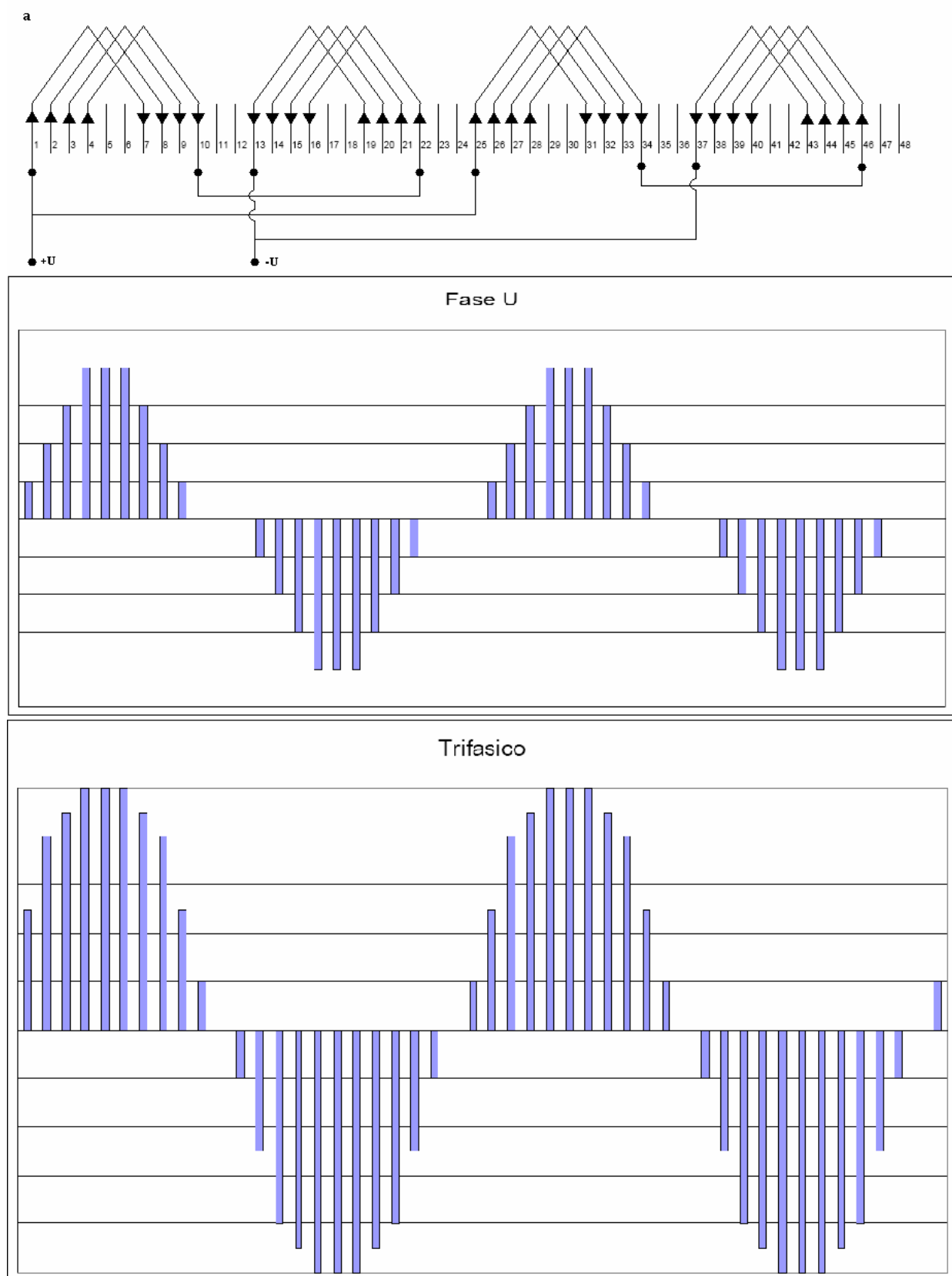


Figura 3.1 – Esquema de ligação e onda de indução no entreferro por fase e trifásico para o enrolamento Dahlander na configuração de 4 pólos.

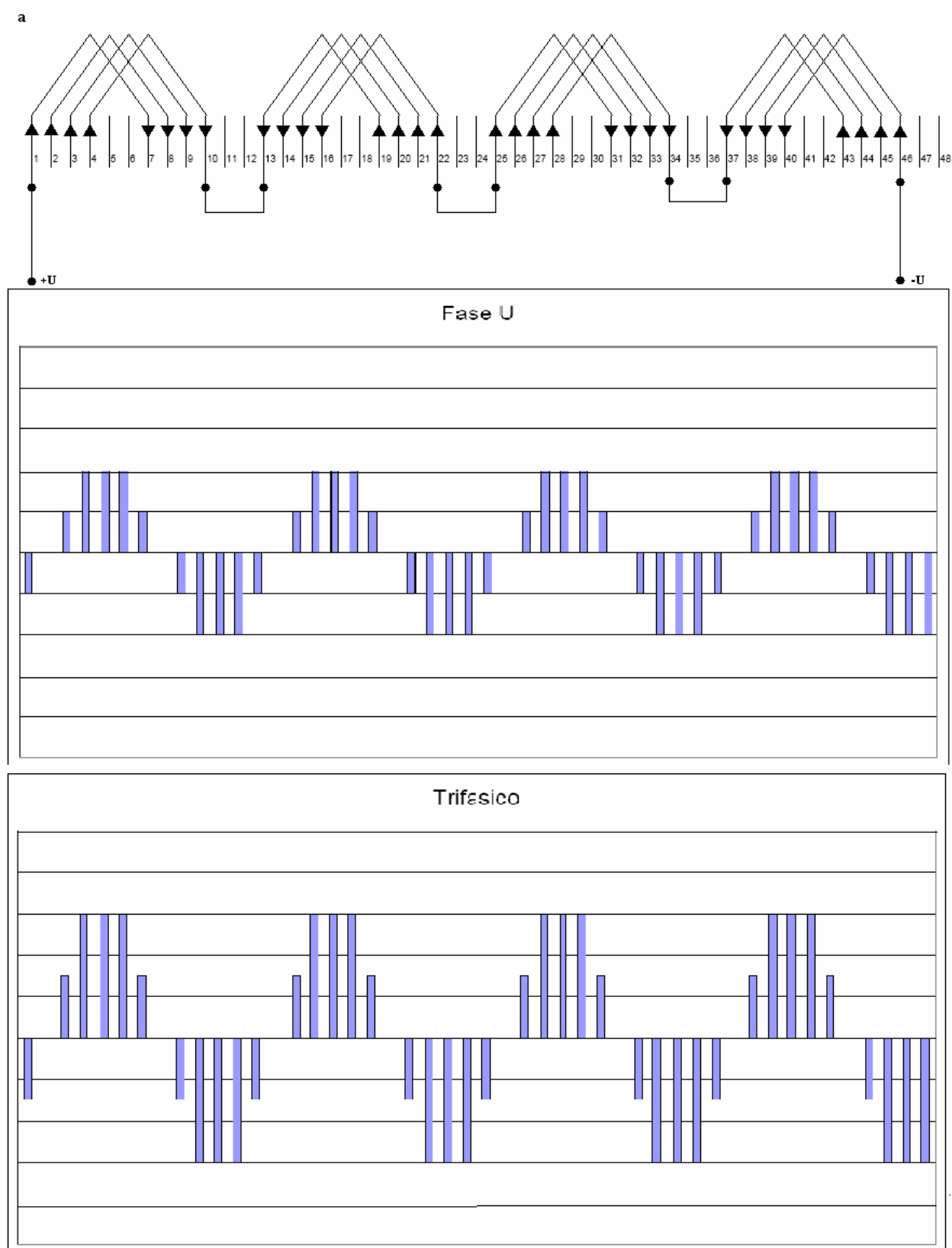


Figura 3.2 - Esquema de ligação e onda de indução no entreferro por fase e trifásico para o enrolamento Dahlander na configuração de 8 pólos.

3.3.1.1 Conjugado Constante

Para este tipo de característica de conjugado x rotação, a conexão das fases é feita da seguinte forma:

Baixa Velocidade: Δ (série)

Alta Velocidade: YY (paralelo)

A Figura 3.3 mostra os terminais nesta ligação, para um motor 4/8 pólos.

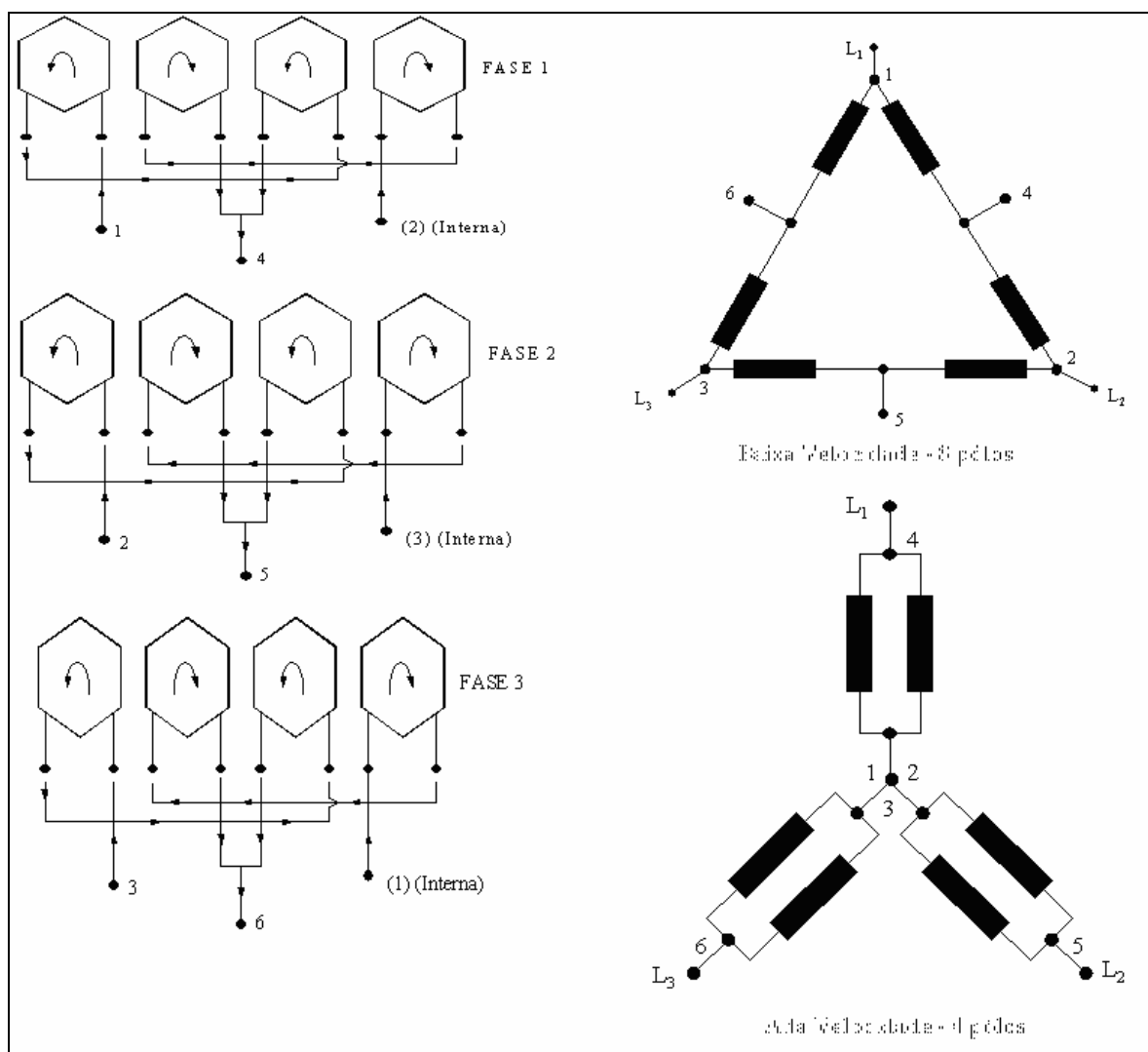


Figura 3.3 – Conexão para conjugado constante.

A potência desenvolvida pelo enrolamento ligado na baixa velocidade é dada por:

$$P_b = 3 U_L \cdot I \cdot \eta_b \cdot \cos \phi_b \quad (33)$$

Onde:

- P_b : potência do motor na baixa velocidade [W]
- U_L : tensão de alimentação de linha [V]
- I : corrente nos condutores do motor [A]
- h_b : rendimento do motor na baixa velocidade
- $\cos j_b$: fator de potência do motor na baixa velocidade

A potência do motor na alta velocidade é dada por:

$$P_a = 3 \cdot \left(\frac{U_L}{\sqrt{3}} \right) \cdot (2I) h_a \cdot \cos j_a \quad (34)$$

$$P_a = 2\sqrt{3} U_L \cdot I \cdot h_a \cdot \cos j_a \quad (35)$$

Onde o significado dos termos são os mesmos do enrolamento de baixa rotação.

A relação da potência fica:

$$\frac{P_b}{P_a} = \frac{3U_L \cdot I \cdot h_b \cdot \cos j_b}{2\sqrt{3} \cdot U_L \cdot I \cdot h_a \cdot \cos j_a} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{h_b \cdot \cos j_b}{h_a \cdot \cos j_a} \quad (36)$$

Conseqüentemente a relação de torque:

$$\frac{T_b}{T_a} = \frac{P_b \cdot \omega_a}{P_a \cdot \omega_b} = \sqrt{3} \cdot \frac{h_b \cdot \cos j_b}{h_a \cdot \cos j_a} \quad (37)$$

Onde:

$\omega_a = 2\omega_b$: frequência angular de rotação [rad/s]

A relação $(h_b \cdot \cos j_b / h_a \cdot \cos j_a)$ é menor que a unidade, porque o fator de potência do enrolamento de baixa velocidade (maior número de pólos) é bem menor que o de alta velocidade, também porque o rendimento h_b é menor que h_a .

De uma maneira geral a relação é da ordem de 0,7. Logo:

$$\frac{T_b}{T_a} = \sqrt{3} \cdot 0,7 = 1,21$$

esta relação é próxima da unidade o que justifica o termo conexão de conjugado constante.

3.3.1.2 Potência Constante

Para este tipo de característica de conjugado x rotação, a conexão das fases é feita da seguinte forma:

Baixa Velocidade: YY (paralelo)

Alta Velocidade: Δ (série)

A Figura 3.4 mostra os terminais nesta ligação, para um motor 4/8 pólos.

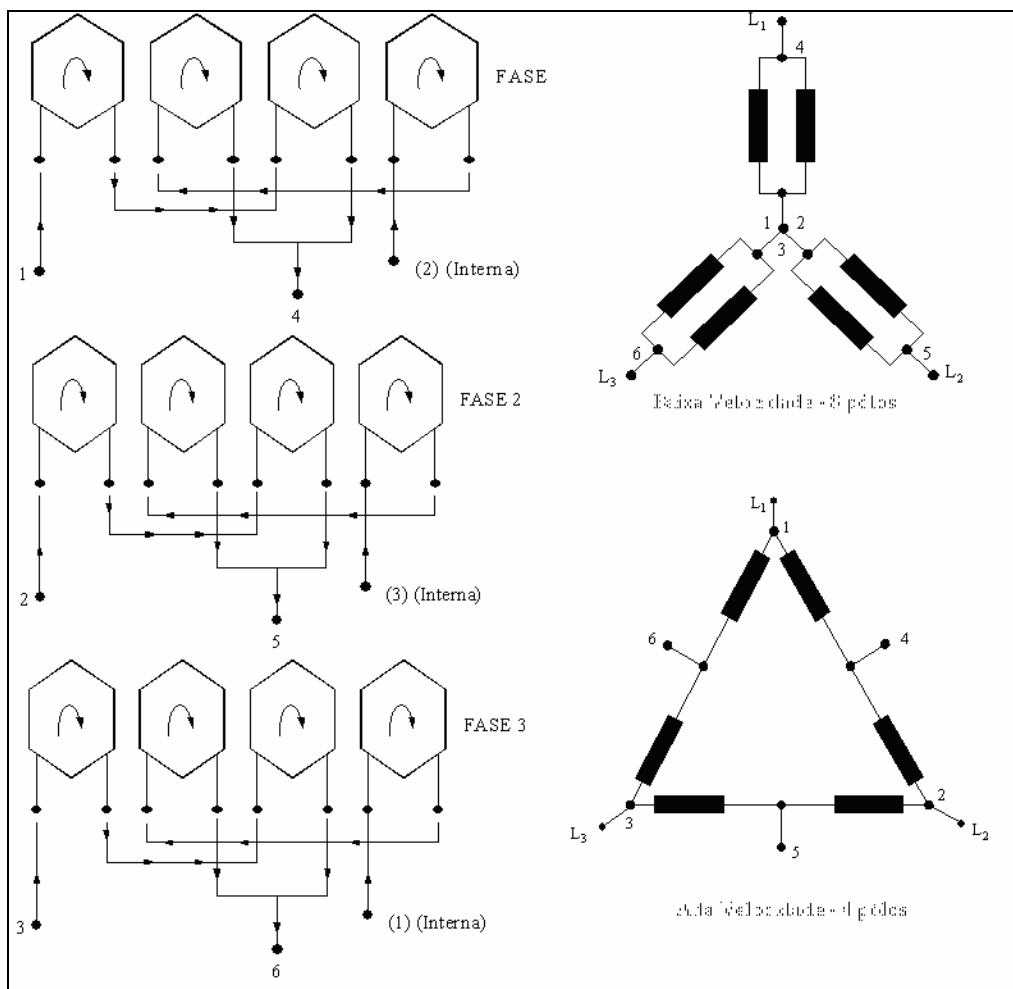


Figura 3.4 – Conexão para potência constante.

A potência desenvolvida pelo enrolamento de baixa velocidade fica:

$$P_b = 3 \cdot \left(\frac{U_L}{\sqrt{3}} \right) (2I) \cdot h_b \cdot \cos j_b \quad (38)$$

$$P_b = 2 \sqrt{3} U_L \cdot I \cdot h_b \cdot \cos j_b \quad (39)$$

Para o enrolamento de alta velocidade temos:

$$P_a = 3 U_L \cdot I \cdot h_a \cdot \cos j_a \quad (40)$$

A relação de potência fica:

$$\frac{P_b}{P_a} = \frac{2 \sqrt{3} U_L \cdot I \cdot h_b \cdot \cos j_b}{3 \cdot U_L \cdot I \cdot h_a \cdot \cos j_a} = 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{h_b \cdot \cos j_b}{h_a \cdot \cos j_a} \quad (41)$$

A relação de torque fica:

$$\frac{T_b}{T_a} = \frac{P_b \cdot \omega_a}{P_a \cdot \omega_b} = 4 \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{h_b \cdot \cos j_b}{h_a \cdot \cos j_a} \quad (42)$$

como a relação de potência é, $\left(2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot 0,7 = 0,81 \right)$, aproximadamente igual à unidade, justifica-se a denominação conexão de potência constante.

3.3.1.3 Conjugado Variável

Para este tipo de característica de conjugado x rotação, a conexão das fases é feita da seguinte forma:

Baixa Velocidade: Y (série)

Alta Velocidade: YY (paralelo)

A Figura 3.5 mostra os terminais nesta ligação, para um motor 4/8 pólos.

A potência na baixa rotação fica:

$$P_b = 3 \cdot \left(\frac{U_L}{\sqrt{3}} \right) \cdot I \cdot h_b \cdot \cos j_b \quad (43)$$

$$P_b = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I \cdot h_b \cdot \cos j_b \quad (44)$$

Para alta rotação tem-se:

$$P_a = 3 \left(\frac{U_L}{\sqrt{3}} \right) (2 I) \cdot h_a \cdot \cos j_a \quad (45)$$

$$P_a = 2 \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I \cdot h_a \cdot \cos j_a \quad (46)$$

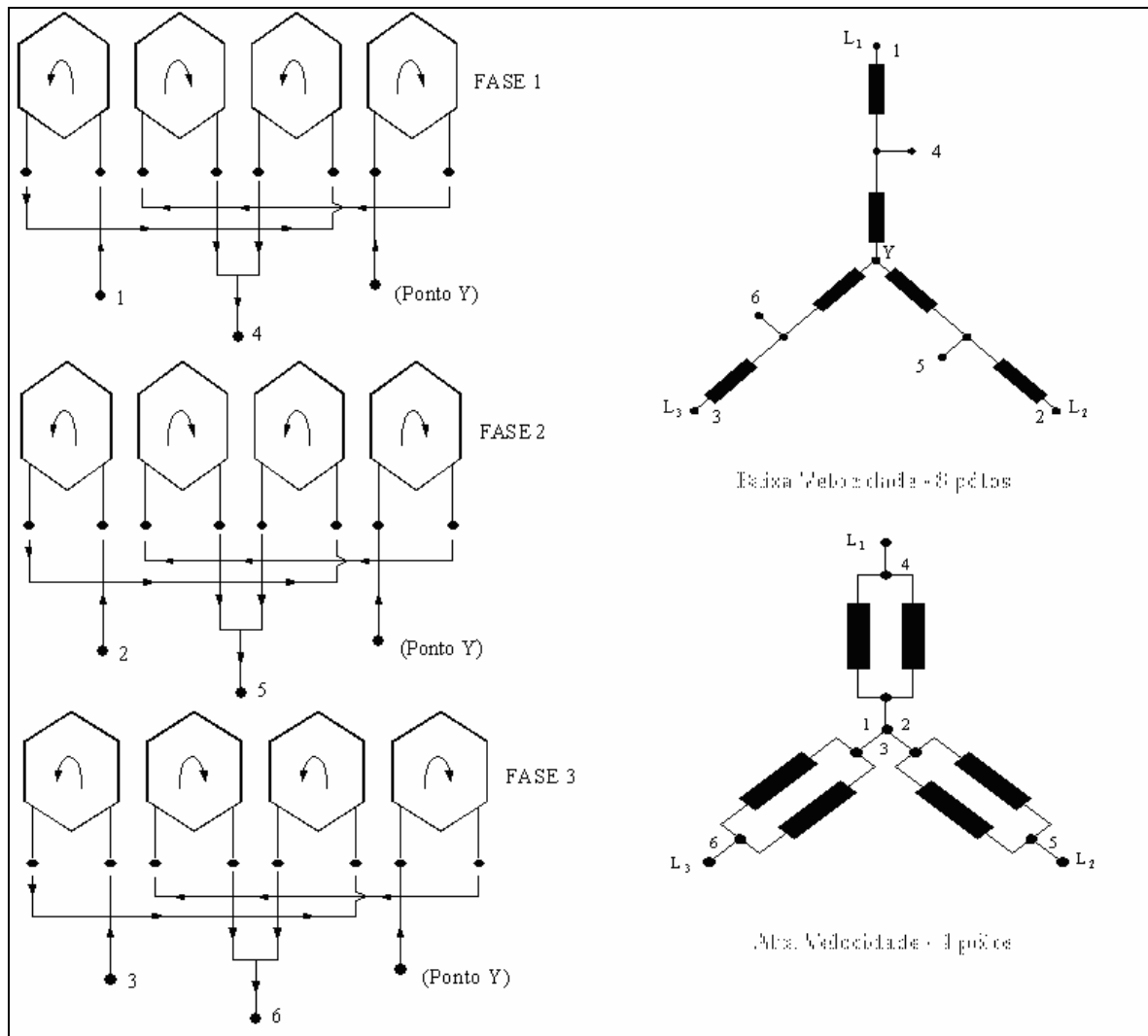


Figura 3.5 – Conexão para conjugado variável.

A relação de potência é dada por:

$$\frac{P_b}{P_a} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot I \cdot h_b \cdot \cos j_b}{2\sqrt{3} \cdot U_L \cdot I \cdot h_a \cdot \cos j_a} = \frac{I \cdot h_b \cdot \cos j_b}{2 \cdot h_a \cdot \cos j_a} \approx 0,35 \quad (47)$$

A relação de torque é dada por:

$$\frac{T_b}{T_a} = \frac{P_b \cdot w_a}{P_a \cdot w_b} = \frac{h_b \cdot \cos j_b}{h_a \cdot \cos j_a} \approx 0,7 \quad (48)$$

Esta relação de aproximadamente 0,7 justifica o nome de conexão de conjugado variável.

3.4 ENROLAMENTOS INDEPENDENTES

Conforme citado anteriormente, o enrolamento Dahlander possui a limitação de somente ser possível gerar polaridades cuja relação entre o número de pólos seja de 1 para 2.

Para aplicações onde é desejável obter polaridades cuja razão não seja de 1 para 2, uma opção é utilizar enrolamentos independentes. Além disso, se for necessária a opção de mais do que duas polaridades na mesma máquina, ou até mesmo gerar polaridades com relação de 1 para 2, assim como o Dahlander, pode-se utilizar um enrolamento independente para cada polaridade.

Quando um enrolamento está operando, o(s) outro(s) enrolamento(s) está(ão) desconectado(s), tendo a máquina assim a polaridade do enrolamento em operação.

Para projetar uma máquina com mais de um enrolamento independente, é necessário levar em consideração que estes enrolamentos deverão coexistir simultaneamente sobre o mesmo núcleo magnético. Assim, o número de ranhuras deverá atender as polaridades dos enrolamentos independentes. Além disso, o sistema deve ser projetado de tal forma que as interações devido às concatenações mútuas entre os enrolamentos independentes sejam anuladas em cada circuito fechado que existir. Desta forma, cada caminho paralelo interno que faça parte de um dado enrolamento independente, em função do(s) outro(s) enrolamento(s), que deva(m) coexistir na mesma máquina, deve ser planejado de forma a anular todas as interações magnéticas que tiver sobre si, relativamente ao fluxo magnético originário deste(s) outro(s) enrolamento(s).

Devido ao fato do núcleo do estator ter de suportar simultaneamente dois ou mais enrolamentos isolados, as dimensões da máquina aumentam, o que resulta num custo maior. É por esta razão que quando a aplicação solicita polaridades com relação de 1 para 2, se utiliza o enrolamento Dahlander por ter um menor custo.

3.5 CONCLUSÕES

Foram abordadas neste capítulo algumas formas de variar a velocidade de um motor de indução:

- Inversor de frequência: que através de chaveamentos pode fornecer ao motor frequência variável.
- Enrolamento Dahlander: consiste de um enrolamento projetado de forma que, alterando algumas conexões das bobinas é possível gerar duas polaridades. Uma característica marcante do enrolamento Dahlander é que estas duas polaridades sempre apresentam a relação de 2:1.
- Enrolamento Independente: trata-se de um estator que apresenta nas suas ranhuras dois ou mais enrolamentos, cada enrolamento com uma determinada polaridade. Quando um enrolamento está em operação o outro está desconectado. Ele apresenta uma boa flexibilidade quanto ao número de pólos.

4 TEORIA DA MODULAÇÃO DOS PÓLOS

4.1 INTRODUÇÃO

O princípio segundo o qual o número de pólos de um enrolamento pode ser comutado em outro número de pólos através de uma modulação é chamado de *Pole-Amplitude Modulation (PAM)*. Este processo foi desenvolvido pelos Professores Rawcliffe e Fong da Universidade de Bristol, Inglaterra [3].

Os enrolamentos do tipo PAM permitem inúmeras relações de números de pólos [3]. Na modulação da amplitude do pólo, a comutação do pólo se baseia numa inversão no sentido da corrente em alguns grupos de bobinas; e/ou na desconexão de alguns grupos de bobina do enrolamento.

O PAM, de uma maneira geral, necessita de apenas seis terminais de ligação, assim como o enrolamento Dahlander. O enrolamento Dahlander pode ser entendido como um caso especial do PAM, pois também utiliza a inversão do sentido da corrente nas bobinas.

Este capítulo descreve a teoria fundamental do PAM.

Pressupõe-se que, inicialmente, o enrolamento apresenta uma onda de indução senoidal de determinada polaridade. Após a modulação do enrolamento, uma nova onda de indução, idealmente senoidal, se apresenta. Pela ação conjunta destas duas funções senoidais, gera-se duas novas ondas de campo a partir da soma e da diferença dos pares de pólos das funções iniciais. A semelhança deste processo com a teoria conhecida da modulação da amplitude da informação (*Amplitude Modulation – AM*) levou ao nome de *Pole-Amplitude Modulation*.

4.2 MODULAÇÃO DA FASE

As equações em relação ao espaço e ao tempo das ondas fundamentais dos campos alternados no entreferro para as três fases de uma máquina de indução trifásica e simétrica de P_1 pares de pólos podem ser descritas conforme(49):

$$\begin{aligned} b_u(x_1, t) &= B_u \text{sen}(p_1 x_1) \cos(\omega t) \\ b_v(x_1, t) &= B_v \text{sen}\left(p_1 x_1 - \frac{2p}{3}\right) \cos\left(\omega t - \frac{2p}{3}\right) \\ b_w(x_1, t) &= B_w \text{sen}\left(p_1 x_1 - \frac{4p}{3}\right) \cos\left(\omega t - \frac{4p}{3}\right) \end{aligned} \quad (49)$$

Onde:

- b_u : onda de indução no entreferro devido aos enrolamentos da fase U
- B_u : valor máximo da onda de indução no entreferro devido aos enrolamentos da fase U
- p_1 : número de pares de pólos do enrolamento
- x_1 : coordenada estacionária no estator

A alimentação da máquina é feita a partir de uma rede trifásica simétrica. Os valores máximos dos campos no entreferro devem ser modulados no espaço segundo as equações abaixo em função das coordenadas do estator x_1 .

$$\begin{aligned} B_u &= B \cdot \text{sen}(p_m x_1) \\ B_v &= B \cdot \text{sen}(p_m x_1 - a) \\ B_w &= B \cdot \text{sen}(p_m x_1 - 2a) \end{aligned} \quad (50)$$

Onde:

- p_m : número de pares de pólos da onda de modulação
- a : deslocamento das três ondas de modulação na circunferência do estator
- B : amplitude das ondas fundamentais

p_m também pode ser entendido como a diferença do primeiro número de pares pólos para o segundo número de pares pólos.

$$p_m = |p_1 - p_2| \quad (51)$$

Após a modulação, os três campos alternados de indução podem ser descritos por (52).

$$\begin{aligned} b_u(x_1, t) &= B \cdot \text{sen}(p_1 x_1) \cdot \text{sen}(p_m x_1) \cdot \cos(\omega t) \\ b_v(x_1, t) &= B \cdot \text{sen}\left(p_1 x_1 - \frac{2p}{3}\right) \cdot \text{sen}(p_m x_1 - a) \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2p}{3}\right) \\ b_w(x_1, t) &= B \cdot \text{sen}\left(p_1 x_1 - \frac{4p}{3}\right) \cdot \text{sen}(p_m x_1 - 2a) \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4p}{3}\right) \end{aligned} \quad (52)$$

Aplicando a relação trigonométrica (53), obtém-se a equação ((54):

$$\text{sen } a \cdot \text{sen } b = \frac{1}{2} \cos(a - b) - \frac{1}{2} \cos(a + b) \quad (53)$$

$$\begin{aligned} b_u(x_1, t) &= \frac{B}{2} [\cos(p_1 - p_m) \cdot x_1 - \cos(p_1 + p_m) \cdot x_1] \cdot \cos(\omega t) \\ b_v(x_1, t) &= \frac{B}{2} \left[\cos\left((p_1 - p_m) \cdot x_1 - \frac{2p}{3} + a\right) - \cos\left((p_1 + p_m) \cdot x_1 - \frac{2p}{3} - a\right) \right] \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2p}{3}\right) \\ b_w(x_1, t) &= \frac{B}{2} \left[\cos\left((p_1 - p_m) \cdot x_1 - \frac{4p}{3} + 2a\right) - \cos\left((p_1 + p_m) \cdot x_1 - \frac{4p}{3} - 2a\right) \right] \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4p}{3}\right) \end{aligned} \quad (54)$$

O campo do entreferro resultante b_{p_2} da fundamental é obtido através da sobreposição dos três campos das fases. Somando os três campos e para $a = \frac{2p}{3}$ graus mecânicos, obtêm-se o seguinte campo girante:

$$\begin{aligned} b_{p_2}(x_1, t) &= \frac{B}{2} [\cos(p_1 - p_m)x_1 - \cos(p_1 + p_m)x_1] \cos(\omega t) \\ &+ \frac{B}{2} \left[\cos\left((p_1 - p_m)x_1 - \frac{2p}{3} + \frac{2p}{3}\right) - \cos\left((p_1 + p_m)x_1 - \frac{2p}{3} - \frac{2p}{3}\right) \right] \cos\left(\omega t - \frac{2p}{3}\right) \\ &+ \frac{B}{2} \left[\cos\left((p_1 - p_m)x_1 - \frac{4p}{3} + \frac{4p}{3}\right) - \cos\left((p_1 + p_m)x_1 - \frac{4p}{3} - \frac{4p}{3}\right) \right] \cos\left(\omega t - \frac{4p}{3}\right) \end{aligned} \quad (55)$$

Aplicando a relação trigonométrica (56), obtém-se a equação (57):

$$\cos(a \pm b) = \cos a \cdot \cos b \pm \text{sen } a \cdot \text{sen } b \quad (56)$$

$$\begin{aligned}
b_{p_2}(x_1, t) = & \frac{B}{2} [\cos(p_1 - p_m)x_1 - \cos(p_1 + p_m)x_1] \cos(\omega t) \\
& + \frac{B}{2} \left[(\cos(p_1 - p_m)x_1) - \left(\cos(p_1 + p_m)x_1 - \frac{4p}{3} \right) \right] \left[\cos(\omega t) \cdot \cos\left(\frac{2p}{3}\right) + \sin(\omega t) \cdot \sin\left(\frac{2p}{3}\right) \right] \\
& + \frac{B}{2} \left[(\cos(p_1 - p)x_1) - \left(\cos(p_1 + p_m)x_1 - \frac{8p}{3} \right) \right] \left[\cos(\omega t) \cdot \cos\left(\frac{4p}{3}\right) + \sin(\omega t) \cdot \sin\left(\frac{4p}{3}\right) \right]
\end{aligned} \tag{57}$$

$$\begin{aligned}
b_{p_2}(x_1, t) = & \frac{B}{2} \cos(\omega t) [\cos(p_1 - p_m)x_1 - \cos(p_1 + p_m)x_1] \\
& - \frac{B}{4} \cos(\omega t) \left[(\cos(p_1 - p_m)x_1) - \cos\left((p_1 + p_m)x_1 - \frac{4p}{3}\right) \right] \\
& + \frac{B\sqrt{3}}{4} \sin(\omega t) \left[(\cos(p_1 - p_m)x_1) - \cos\left((p_1 + p_m)x_1 - \frac{4p}{3}\right) \right] \\
& - \frac{B}{4} \cos(\omega t) \left[(\cos(p_1 - p_m)x_1) - \cos\left((p_1 + p_m)x_1 - \frac{8p}{3}\right) \right] \\
& - \frac{B\sqrt{3}}{4} \sin(\omega t) \left[(\cos(p_1 - p_m)x_1) - \cos\left((p_1 + p_m)x_1 - \frac{8p}{3}\right) \right]
\end{aligned} \tag{58}$$

$$\begin{aligned}
b_{p_2}(x_1, t) = & \frac{B}{2} \cos(\omega t) [\cos(p_1 - p_m)x_1 - \cos(p_1 + p_m)x_1] \\
& - \frac{B}{4} \cos(\omega t) \left[(\cos(p_1 - p_m)x_1) - \left(\cos(p_1 + p_m)x_1 \cdot \cos\left(\frac{4p}{3}\right) + \sin(p_1 + p_m)x_1 \cdot \sin\left(\frac{4p}{3}\right) \right) \right] \\
& + \frac{B\sqrt{3}}{4} \sin(\omega t) \left[(\cos(p_1 - p_m)x_1) - \left(\cos(p_1 + p_m)x_1 \cdot \cos\left(\frac{4p}{3}\right) + \sin(p_1 + p_m)x_1 \cdot \sin\left(\frac{4p}{3}\right) \right) \right] \\
& - \frac{B}{4} \cos(\omega t) \left[(\cos(p_1 - p_m)x_1) - \left(\cos(p_1 + p_m)x_1 \cdot \cos\left(\frac{4p}{3}\right) + \sin(p_1 + p_m)x_1 \cdot \sin\left(\frac{8p}{3}\right) \right) \right] \\
& - \frac{B\sqrt{3}}{4} \sin(\omega t) \left[(\cos(p_1 - p_m)x_1) - \left(\cos(p_1 + p_m)x_1 \cdot \cos\left(\frac{4p}{3}\right) + \sin(p_1 + p_m)x_1 \cdot \sin\left(\frac{8p}{3}\right) \right) \right]
\end{aligned} \tag{59}$$

$$\begin{aligned}
b_{p_2}(x_1, t) = & \frac{B}{2} \cos(\omega t) [\cos(p_1 - p_m)x_1 - \cos(p_1 + p_m)x_1] \\
& - \frac{B}{4} \cos(\omega t) \left[\cos(p_1 - p_m)x_1 + \frac{1}{2} \cos(p_1 + p_m)x_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(p_1 + p_m)x_1 \right] \\
& + \frac{B\sqrt{3}}{4} \sin(\omega t) \left[(\cos(p_1 - p_m)x_1) - \frac{1}{2} \cos(p_1 + p_m)x_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(p_1 + p_m)x_1 \right] \\
& - \frac{B}{4} \cos(\omega t) \left[\cos(p_1 - p_m)x_1 + \frac{1}{2} \cos(p_1 + p_m)x_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(p_1 + p_m)x_1 \right] \\
& - \frac{B\sqrt{3}}{4} \sin(\omega t) \left[(\cos(p_1 - p_m)x_1) + \frac{1}{2} \cos(p_1 + p_m)x_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(p_1 + p_m)x_1 \right]
\end{aligned} \tag{60}$$

$$\begin{aligned}
b_{p_2}(x_1, t) = & \frac{B}{2} \cos(\omega t) [\cos(p_1 - p_m)x_1 - \cos(p_1 + p_m)x_1] \\
& - \frac{B}{4} \cos(\omega t) [2 \cos(p_1 - p_m)x_1 + \cos(p_1 + p_m)x_1] \\
& - \frac{B\sqrt{3}}{4} \sin(\omega t) [\sqrt{3} \sin(p_1 + p_m)x_1]
\end{aligned} \tag{61}$$

$$b_{p_2}(x_1, t) = -\frac{3B}{4} \cos(\omega t) [\cos(p_1 + p_m)x_1] + \frac{3B}{4} \sin(\omega t) [\sin(p_1 + p_m)x_1] \tag{62}$$

Aplicando novamente a relação trigonométrica (56) tem-se:

$$b_{p_2}(x_1, t) = -\frac{3}{4} \cdot B \cdot \cos((p_1 + p_m) \cdot x_1 + \omega t) \tag{63}$$

Este campo tem p_2 pares de pólos, que é maior do que o número de pares de pólos inicial.

$$p_2 = p_1 + p_m \tag{64}$$

Na Figura 4.1, por simplicidade, as formas de ondas, que idealmente são senóides, são representadas por trapézios. Nesta mesma figura pode ser visualizada a teoria que fundamenta o PAM. Neste caso em particular, uma onda de 8 pólos (Figura 4.1.a) é modulada por uma onda de 2 pólos (Figura 4.1.b), resultando a Figura 4.1.c. Analisando as Figura 4.1.d e Figura 4.1.e, é possível notar a presença de 6 e 10 pólos sobrepostos na Figura 4.1.c.

Uma modulação do campo, contendo os dois pólos sobrepostos (6 e 10 pólos), seria de pouca utilidade. Fica clara a necessidade de eliminar um dos dois pólos gerados.

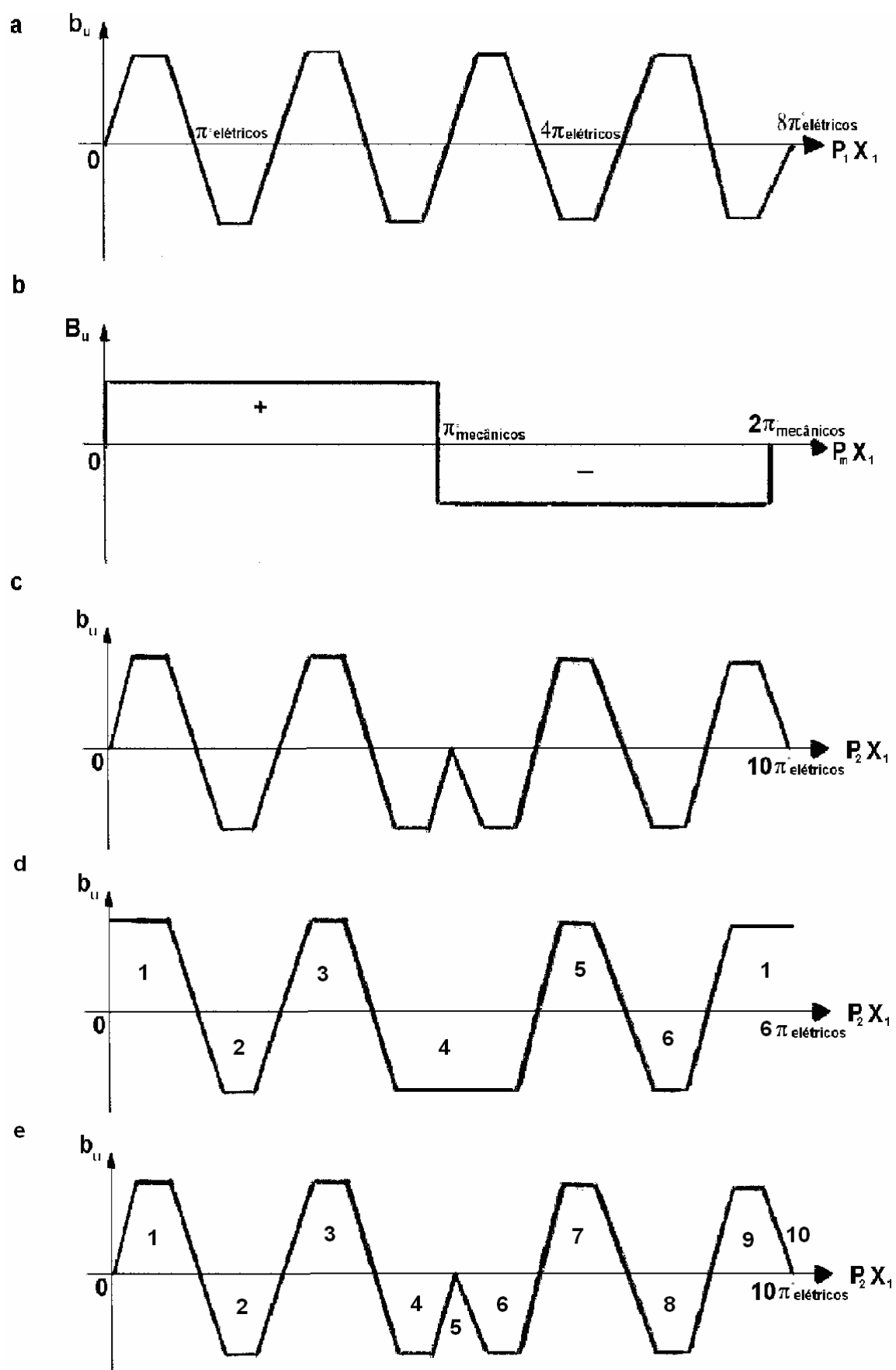


Figura 4.1 – Princípio de operação do PAM.

Para um enrolamento trifásico, supondo que a distância entre as fases do enrolamento original seja dada pela equação (65), onde r é um número inteiro diferente de 3 ou de qualquer múltiplo de 3, de modo que uma fase não coincida com as outras, tem-se:

$$r \cdot \left(\frac{2p}{3} \right) \quad (65)$$

A distância entre fases, após a modulação será:

$$\frac{p_1 \pm p_m}{p_1} \cdot r \cdot \frac{2p}{3} \quad (66)$$

De acordo com [3], para eliminar o número maior $(p_1 + p_m)$ ou menor $(p_1 - p_m)$ número de pólos modulados, a condição é que:

$$\frac{p_1 \pm p_m}{p_1} \cdot r \cdot \frac{2p}{3} = 2p \cdot m \quad (67)$$

ou

$$\frac{m}{r} = \frac{1}{3} \left(1 \pm \frac{p_m}{p_1} \right) \quad (68)$$

onde m é um número inteiro.

Para a condição de eliminar uma determinada polaridade da modulação, tem-se:

$$\frac{m}{r} = \frac{1}{3} \left(1 + \frac{p_m}{p_1} \right) \quad (69)$$

ou

$$\frac{m}{r} = \frac{1}{3} \left(1 - \frac{p_m}{p_1} \right) \quad (70)$$

Se a equação (69) for satisfeita, o campo modulado de polaridade superior irá se anular; Se a equação (70) for satisfeita, o campo modulado de polaridade inferior irá se anular.

Algumas combinações de pólos que atendem à condição acima citada são:

- $8/10 : 14/16 : (6n+2)/(6n+4)$, para $p_m = 2$
- $10/14 : 16/20 : (6n+4)/(6n+8)$, para $p_m = 4$
- $24/30 : 42/48 : (6n+6)/(6n+12)$, para $p_m = 6$

Onde:

n : número natural.

Para $n = 0$, as seguintes combinações serão obtidas:

- $2/4 : 4/8 : 6/12$

Ou seja, para $n = 0$ apresenta-se o enrolamento Dahlander, que pode ser considerado como um caso particular do princípio da modulação da amplitude.

Seja um enrolamento trifásico de 8 pólos. Cada fase é modulada por uma onda retangular defasada de 120° mecânicos, conforme Figura 4.2. Cada fase modulada irá gerar campos cujas fundamentais são 6 e 10 pólos. No caso da onda de 6 pólos gerada por cada fase, devido à defasagem das fase alocadas nas ranhuras do estator, quando se somar os campos das três fases, eles irão se anular, como pode ser visto na Figura 4.2. Na Figura 4.2 se apresenta a onda de indução de 8 pólos de uma fase, que após a modulação por uma onda de 2 pólos, irá gerar uma onda de 6 e de 10 pólos.

Será feita uma análise visual para a onda de 6 pólos gerada após a modulação. Na Figura 4.2, apresentou-se apenas a onda de 6 pólos para cada fase em um determinado instante de tempo. Considerando que no instante de tempo da Figura 4.2 as tensões estejam conforme apresentado no topo direito da figura, somando as três fases, a onda de 6 pólos será anulada. Se o espaçamento elétrico entre as fases de um enrolamento trifásico for de $2p \cdot n$, onde n é um número inteiro, e os enrolamentos são alimentados por correntes trifásicas, o campo resultante será zero em qualquer instante de tempo para a onda de 6 pólos.

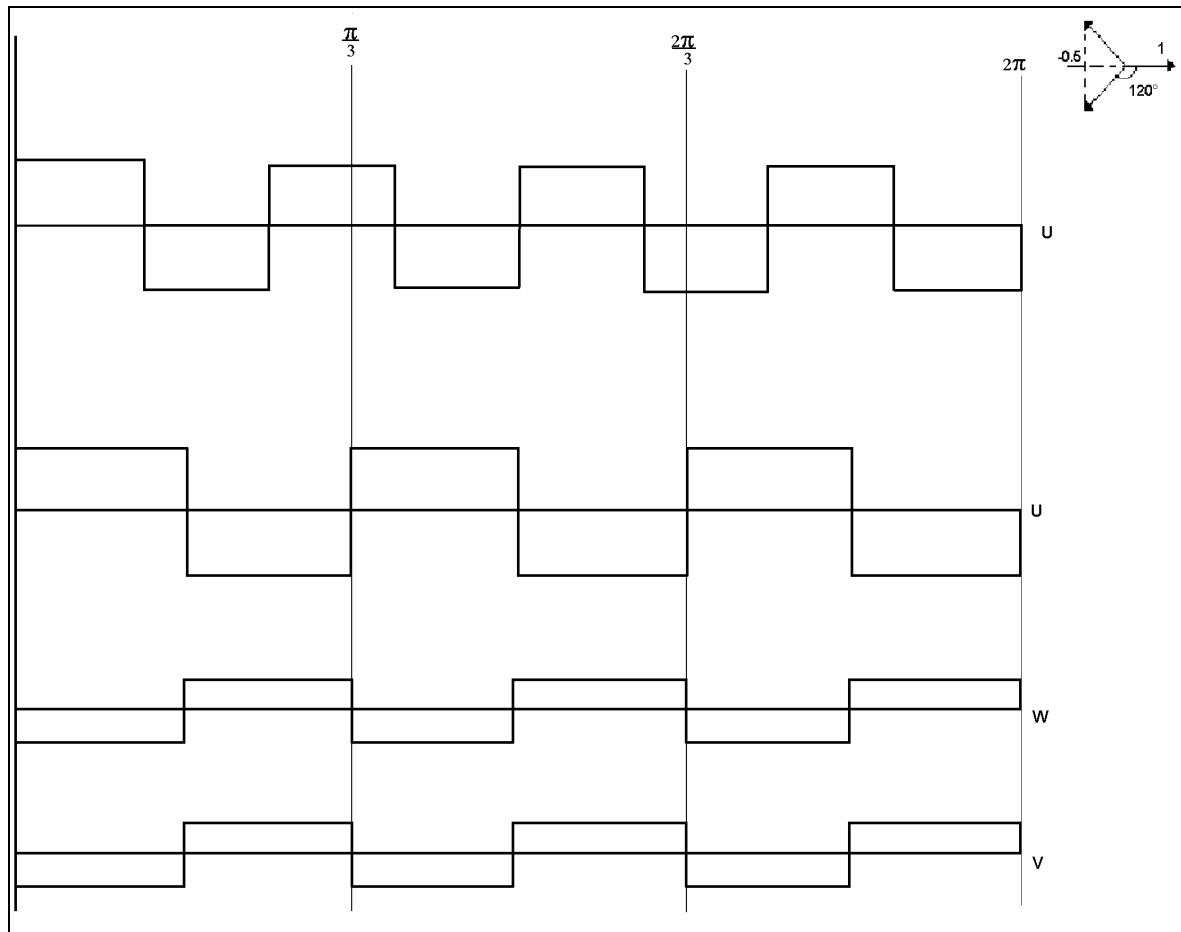


Figura 4.2 - Eliminação da onda modulada de 6 pólos.

No caso da Figura 4.2, que originará uma combinação de 8/10 pólos, temos $p_1 = 8$, $p_m = 2$, $m = 1$ e $r = 4$, a equação (70) conduz à:

$$\frac{1}{4} = \frac{1}{3} \left(1 - \frac{2}{8} \right)$$

o que satisfaz a equação para que o campo de 6 pólos se anule. Para que r seja igual a 4, é necessário defasar as fases $4 \cdot \frac{2p}{3}$ graus elétricos, que é equivalente a $\frac{2p}{3}$ graus mecânicos.

4.3 CAMPOS HARMÔNICOS

Na teoria, presume-se que as curvas de campo e as ondas de modulação sejam senoidais. Na prática, as duas possuem harmônicas.

Como a forma da onda de modulação não é senoidal, mas sim retangular, a onda de indução da primeira polaridade é modulada não só pela fundamental de 2 pólos, mas por todas as harmônicas contidas na onda retangular. A forma de onda retangular apresenta apenas os termos ímpares da série de Fourier. Cada termo da série harmônica irá produzir sua própria modulação resultante.

Assim deve-se distinguir 3 grupos de modulação:

- Modulação da fundamental do enrolamento pela fundamental da onda de modulação;
- Modulação da fundamental do enrolamento pelas harmônicas da onda de modulação;
- Modulação das harmônicas do enrolamento pelas harmônicas da onda de modulação.

O primeiro grupo é o de maior importância na onda de campo no entreferro.

Utilizando o caso da onda de 8 pólos, na Tabela 1 estão apresentados os números de pólos resultantes da modulação, utilizando a forma de onda retangular de passo pleno, considerando toda a série de harmônicas desta forma de onda. Na coluna da esquerda, está a polaridade da forma de onda original; na coluna do meio, está o número de pólos da harmônica que irá modular a onda original; e na coluna da direita está o número de pólos da onda resultante, indicada por um sinal:

+: se o sentido de rotação for o mesmo da onda original;

-: se o sentido de rotação for contrário ao da onda original;

0: amplitude zero;

Tabela 1 - Exemplo do número de pólos resultantes da modulação.

Onda Original	Onda de Modulação	Número de pólos resultantes	
Fundamental 8 pólos	2 pólos (Fundamental)	0	+
		6 pólos	10 pólos
	6 pólos (3° harmônica)	-	-
		2 pólos	14 pólos
	10 pólos (5° harmônica)	-	0
		2 pólos	18 pólos
	14 pólos (7° harmônica)	0	+
		6 pólos	22 pólos
	18 pólos (9° harmônica)	+	-
		10 pólos	26 pólos
	22 pólos (11° harmônica)	-	0
		14 pólos	30 pólos
	26 pólos (13° harmônica)	0	+
		18 pólos	34 pólos

4.4 ONDA DE MODULAÇÃO

Se numa fase do enrolamento, consistindo de duas derivações iguais do enrolamento, inverte-se o sentido da corrente numa destas derivações, isso equivale a uma modulação da curva do campo da fase por uma onda retangular de passo pleno, conforme Figura 4.1.b. A curva de campo do primeiro número de pares de pólos é mostrada na Figura 4.1.a. Inverter a corrente da segunda metade do enrolamento significa inverter o sinal da segunda metade da onda de campo. O mesmo resultado é obtido multiplicando a onda de campo original pela onda quadrada da Figura 4.1.b.

Uma modulação simétrica significa que tanto o enrolamento do primeiro número de pares de pólos quanto para o segundo são simétricos, seguindo as condições de simetria apresentadas no capítulo 2.

Para se obter um enrolamento simétrico após a modulação, é necessário que a onda de modulação de uma fase coincida suas passagens por zero com as passagens por zero da curva de campo da fase.

Não é possível realizar a modulação simétrica com enrolamentos onde o número de pólos ou o número de pólos da onda de modulação sejam igual ao número de fases ou a um múltiplo deste.

Esta afirmação é melhor explicada através das Figura 4.3 e Figura 4.4. Na Figura 4.3 é obedecida a regra citada acima. Assim, pode-se notar que a modulação acontece de forma apropriada. Já na Figura 4.4 a passagem por zero da onda de modulação não coincide com a passagem por zero da onda original, o que não irá resultar na modulação desejada.

Para se reduzir as harmônicas da onda de modulação, citadas anteriormente, a onda de modulação deve se aproximar ao máximo de uma senóide. Portanto, na comutação dos pólos não se inverte simplesmente o sentido da corrente na segunda metade dos grupos de bobina de cada fase, mas separam-se bobinas ou grupos inteiros de bobinas.

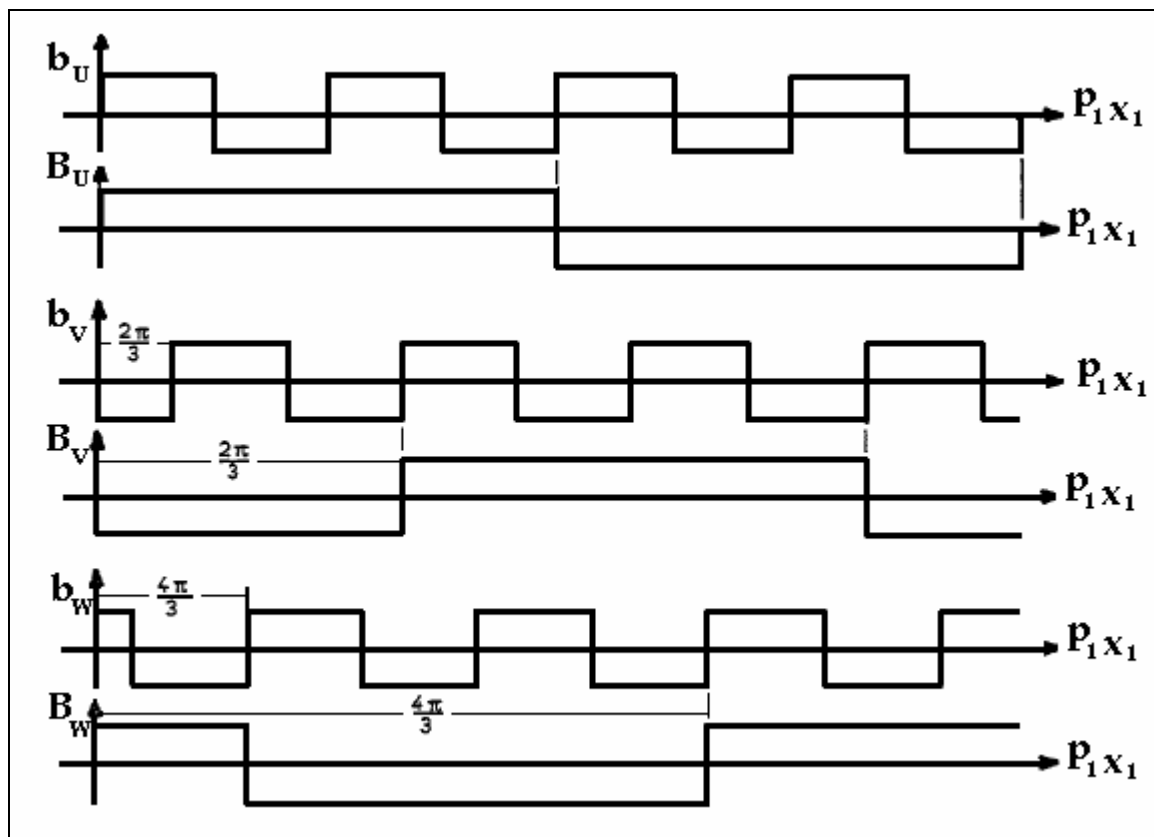


Figura 4.3 - Passagem por zero da onda de modulação coincide com a passagem por zero da onda principal.

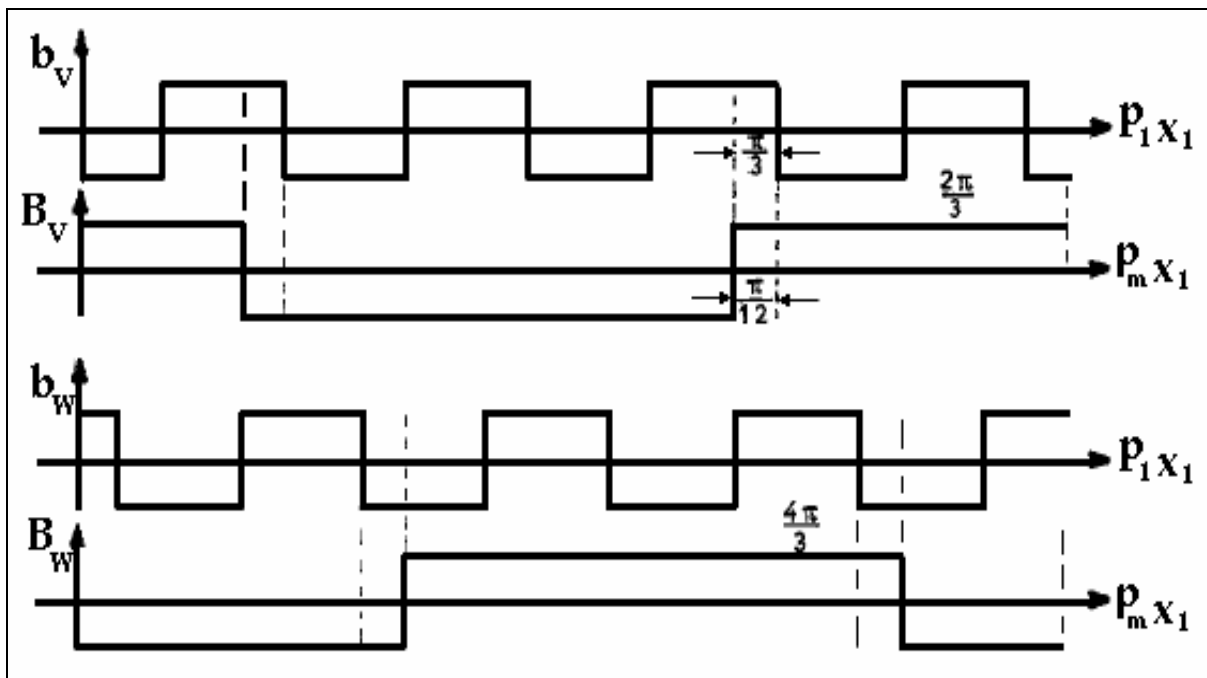


Figura 4.4 - Passagem por zero da onda de modulação não coincide com a passagem por zero da onda principal.

4.5 TIPOS DE ENROLAMENTOS PAM

Através das conexões dos grupos de bobinas e das bobinas, existem várias maneiras de se obter a onda modulante. A cada uma destas opções será designado um número para facilitar o entendimento.

Existem na literatura seis tipos de PAM, sendo eles divididos em modulação simétrica e assimétrica [6]. Este trabalho irá se restringir a explicar apenas sobre dois tipos de modulação do tipo simétrica.

Nos dois tipos de enrolamento PAM foi utilizado como exemplo prático um enrolamento dupla camada de 8 pólos com 72 ranhuras no estator com 8 grupos de bobinas por fase. Após a modulação resultará uma onda de 10 pólos. O motor de indução de 8 / 10 pólos é bastante aplicado na indústria, e por esta razão foi escolhido.

Os enrolamentos serão analisados levando em consideração a forma de onda da indução apresentada no entreferro e utilizando o Diagrama de Goerges que quantifica o conteúdo de dispersão harmônica do enrolamento. O procedimento para

produzir o Diagrama de Goerges e as etapas de cálculos do Diagrama de Goerges para os enrolamentos PAM apresentados neste capítulo se encontram no Anexo 1.

4.5.1 Enrolamento PAM Tipo I

Trata-se de um enrolamento simétrico com grupos de bobinas isoladas no segundo número de pólos.

Na Figura 4.6 é apresentada a onda de indução no entreferro para cada fase e para as três fases somadas no enrolamento originalmente de 8 pólos para o enrolamento Tipo I.

O enrolamento de 8 pólos deve ser comutado para um enrolamento de 10 pólos através da modulação. O processo de modulação é mostrado simplificada na Figura 4.5. A curva (a), que é a onda de indução no entreferro devido aos enrolamentos da fase U, é modulada com uma onda retangular de 2 pólos de três níveis (b). Como resultado, se obteve no entreferro a onda de indução (c) devido à fase U modulada.

A onda de modulação é obtida da seguinte forma:

- o quarto e o oitavo grupos de bobinas são extraídos do circuito;
- o quinto, sexto e sétimo grupos de bobinas tem o sentido da corrente que passa por eles invertido.

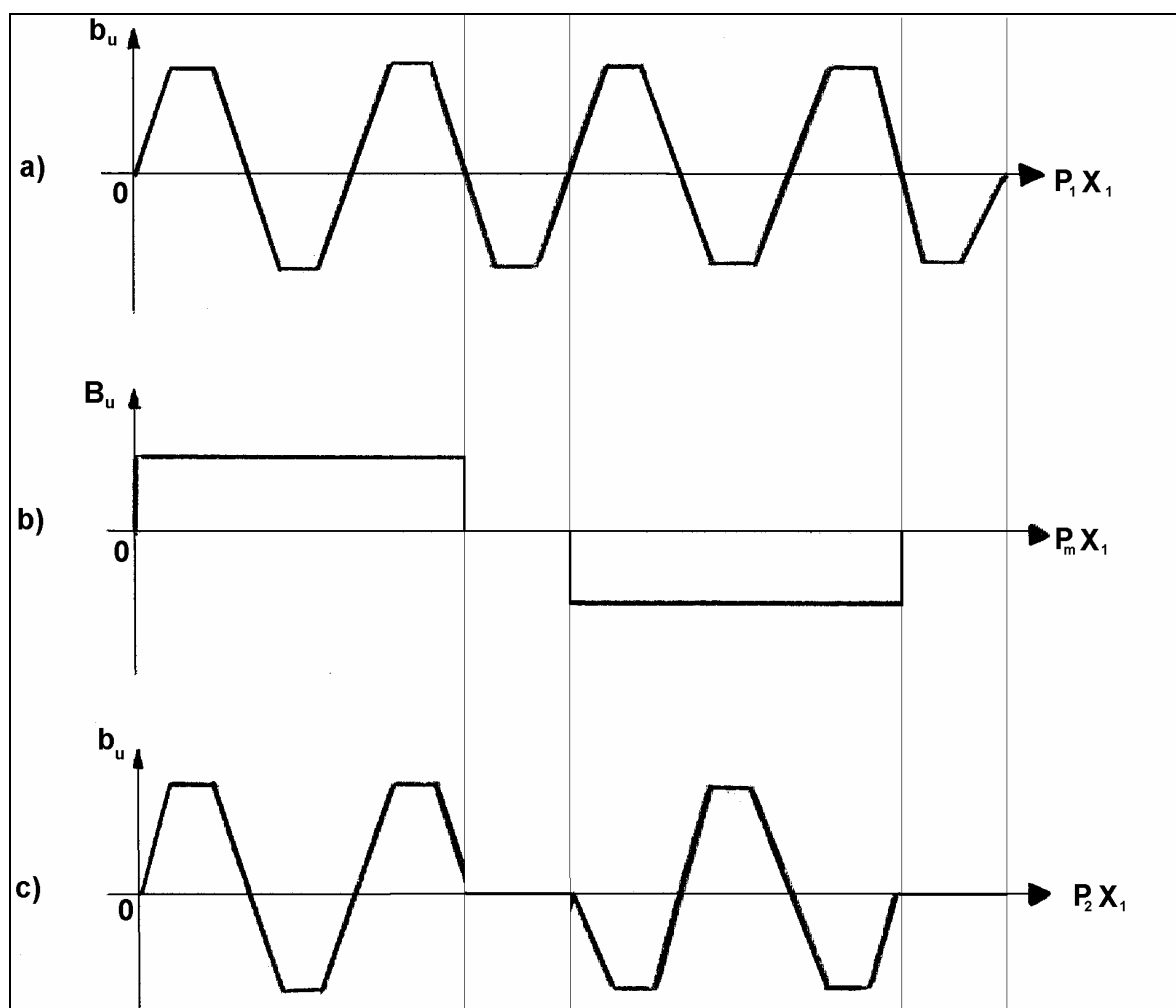


Figura 4.5 - Princípio de funcionamento do enrolamento tipo I.

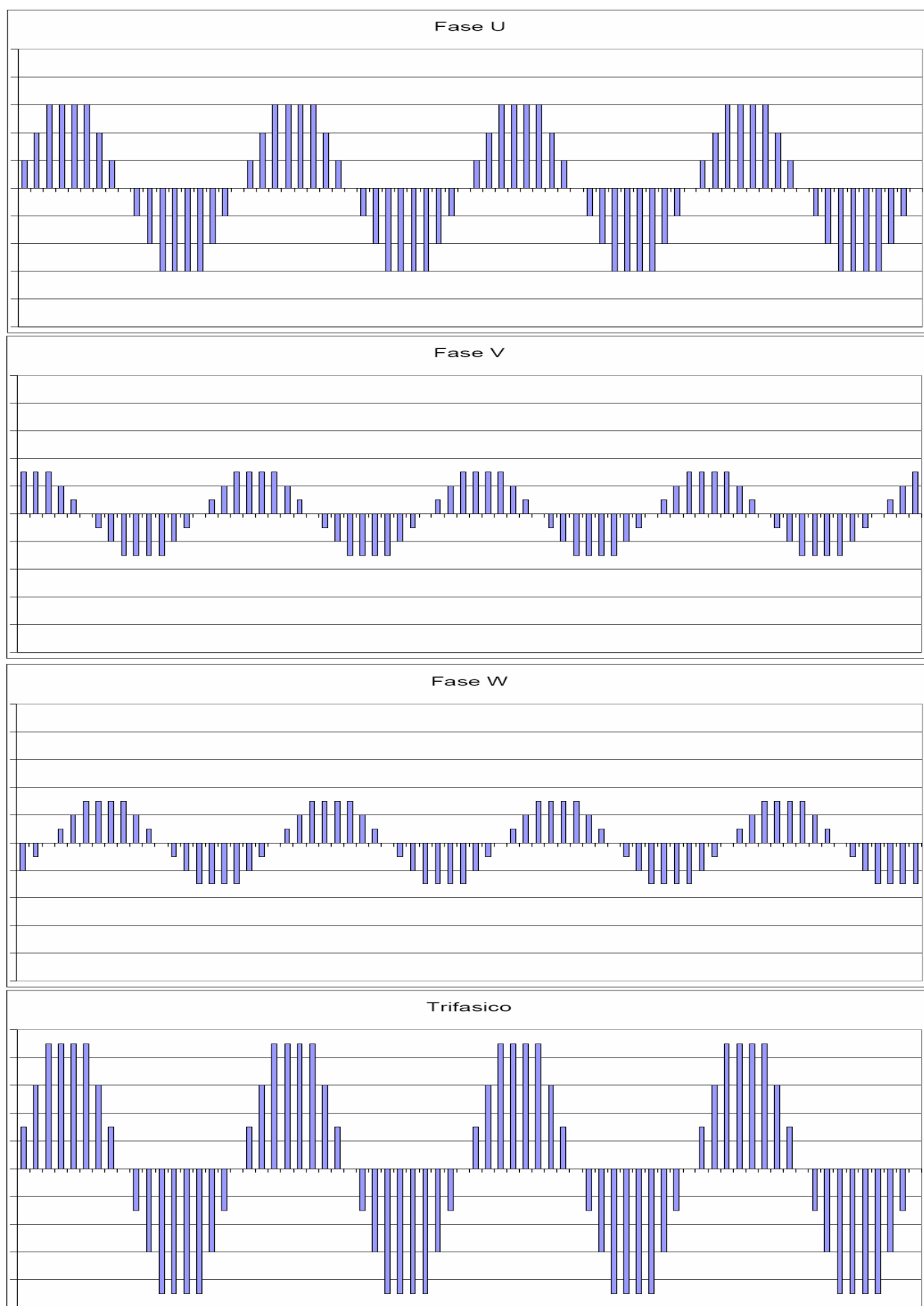


Figura 4.6 - Onda de indução no entreferro por fase e trifásico para o enrolamento tipo I na configuração 8 pólos.

Os inícios das fases deverão estar deslocados entre si de $a = \frac{2p}{3}$ graus mecânicos, que neste caso equivale a 24 ranhuras, de modo que a partir das três curvas de indução das fases somadas no entreferro, a onda de 6 pólos gerada após a modulação irá se anular, restando apenas a onda de 10 pólos. Na Figura 4.7 é apresentada a onda de indução no entreferro para cada fase e para as três fases somadas no enrolamento após a modulação. É possível identificar os 10 pólos presentes na onda trifásica, no entanto o conteúdo harmônico da onda é bastante intenso.

Cada fase de um enrolamento PAM consiste de duas derivações iguais de enrolamento, que para o primeiro número de par de pólos são ligadas em paralelo, e para o segundo número de pares de pólos são ligadas em série. Assim, há a necessidade de apenas seis possibilidades de ligação para realizar a comutação de pólos. Desta forma, podem-se utilizar os mesmos equipamentos de comutação usados nos motores Dahlander.

A fase do enrolamento se divide depois das bobinas especiais em duas derivações paralelas, como pode ser visto nas Figura 4.8, Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11. Nestas bobinas especiais do enrolamento, circula corrente duas vezes maior do que a corrente que circula nas outras bobinas. Como devem gerar o mesmo número de Ampères-espiras, estas bobinas devem ter metade das espiras das outras bobinas. E assim, com o objetivo de manter as mesmas perdas Joules das outras bobinas, deve-se dobrar a seção transversal.

Nas Figura 4.8 e Figura 4.9 é apresentada uma opção de ligação em estrela para a primeira polaridade e também em estrela para a segunda polaridade. Nas Figura 4.10 e Figura 4.11 é apresentada uma opção de ligação em estrela para a primeira polaridade e em delta para a segunda polaridade.

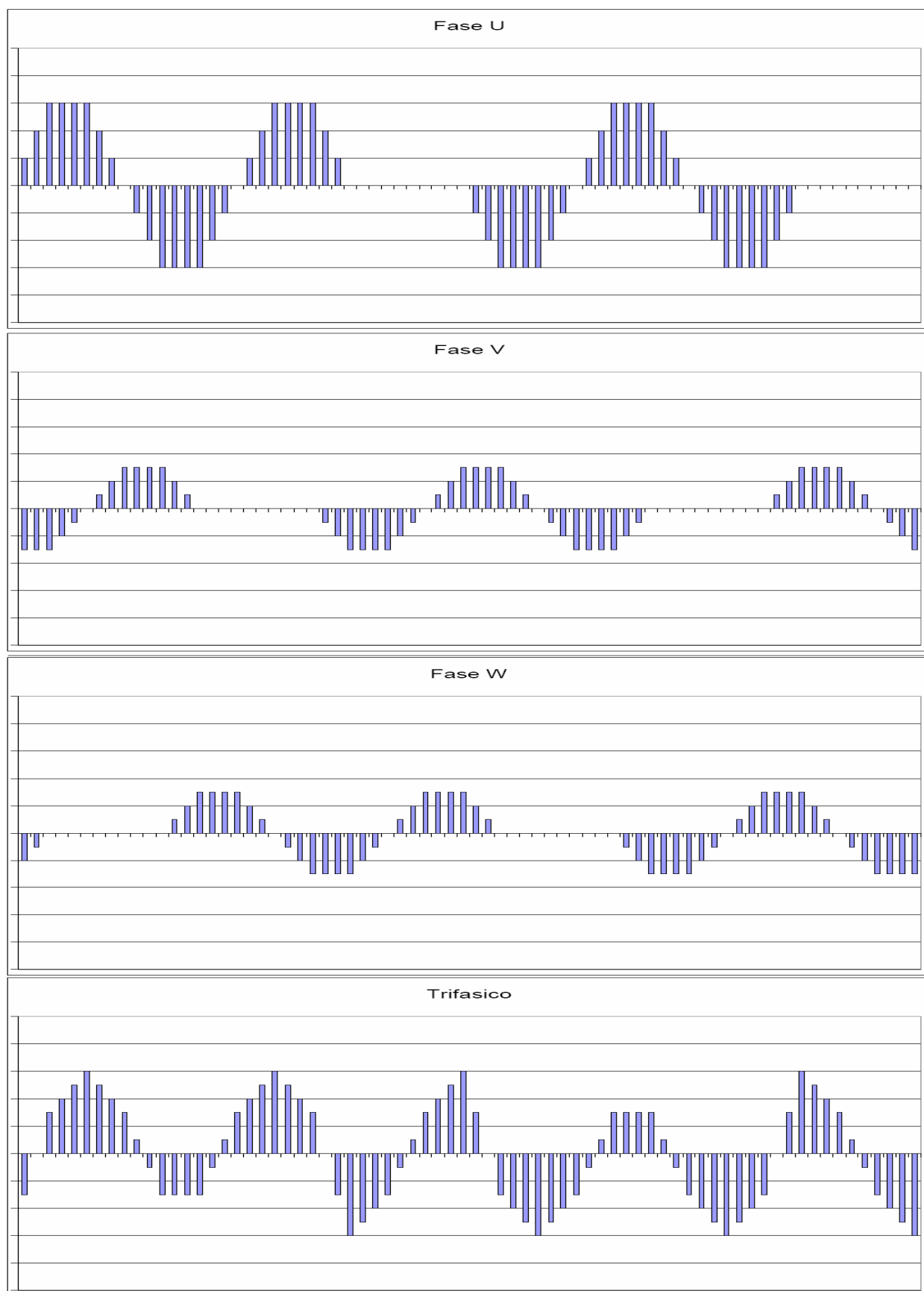


Figura 4.7 - Onda de indução no entreferro por fase e trifásico para o enrolamento tipo I na configuração 10 pólos.

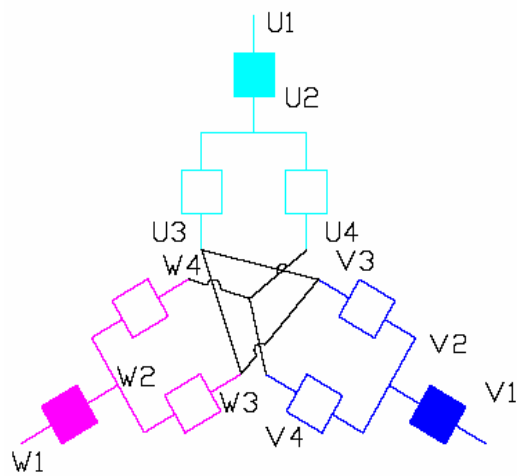


Figura 4.8 – Ligação da primeira polaridade em estrela.

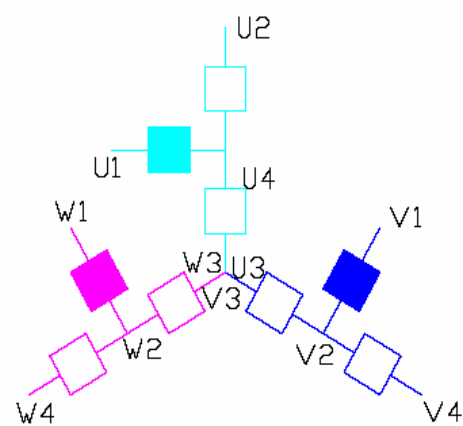


Figura 4.9 – Ligação da segunda polaridade em estrela.

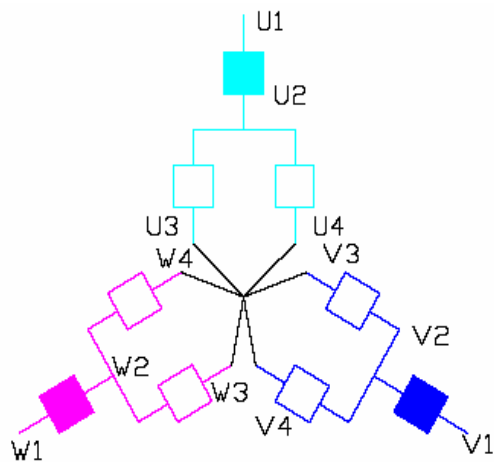


Figura 4.10 – Ligação da primeira polaridade em estrela.

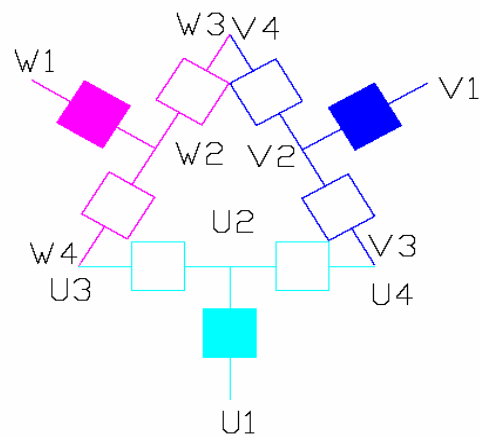


Figura 4.11 – Ligação da segunda polaridade em delta.

A escolha da ligação geralmente é feita considerando o aspecto da adaptação das densidades de fluxo no entreferro.

$$\frac{B_{P_2}}{B_{P_1}} = \frac{U_{f_{P_2}} \cdot W_{P_1} \cdot k_{e_{P_1}} \cdot p_2}{U_{f_{P_1}} \cdot W_{P_2} \cdot k_{e_{P_2}} \cdot p_1} \quad (71)$$

Onde

- $U_{f_{P_1}}$: tensão de fase para a primeira polaridade [V]
- $U_{f_{P_2}}$: tensão de fase para a segunda polaridade [V]
- W_{P_1} : número de espiras da fase para a primeira polaridade

- W_{p2} : número de espiras da fase para a segunda polaridade
- k_{eP1} : fator de enrolamento do campo da fundamental para a primeira polaridade
- k_{eP2} : fator de enrolamento do campo da fundamental para a segunda polaridade

Analisando o Diagrama de Goerges apresentado nas Figura 4.12 e Figura 4.13, é possível perceber visualmente que na transformação de 8 pólos para 10 pólos há uma redução na curva da força eletromotriz, e um aumento na dispersão do diagrama.

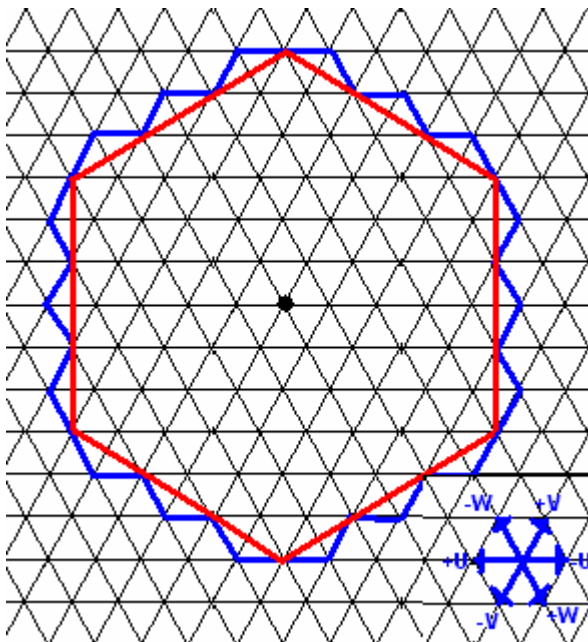


Figura 4.12 - Diagrama de Goerges para configuração 8 pólos para enrolamento tipo I.

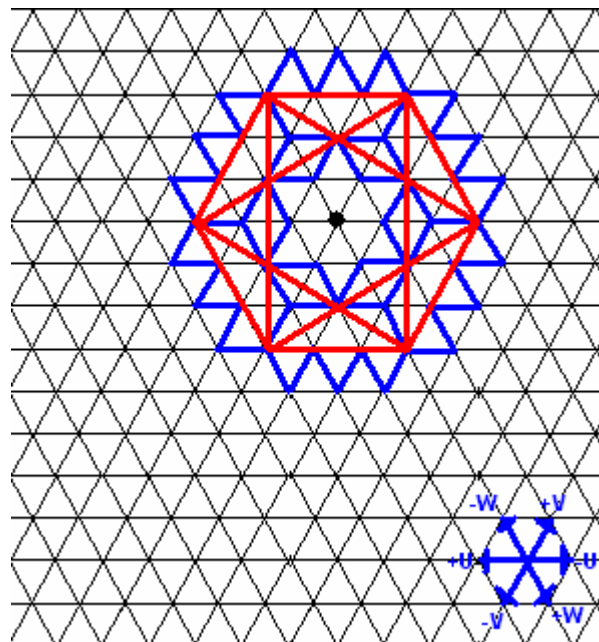


Figura 4.13 - Diagrama de Goerges para configuração 10 pólos para enrolamento tipo I.

Conforme procedimento no Anexo 1, o coeficiente de dispersão harmônica para a configuração de 8 pólos é $s_{d8P} = 1.41\%$, enquanto para a configuração de 10 pólos é $s_{d10P} = 11.515\%$.

Devido a este maior conteúdo harmônico após a modulação, espera-se que haja um aumento nas perdas no ferro; aumento do ruído e vibração de origem eletromagnética, por haver excitações numa faixa maior de frequências.

4.5.2 Enrolamento PAM Tipo II

Trata-se também de um enrolamento simétrico com grupos de bobinas isoladas no segundo número de pólos. Este tipo de enrolamento PAM segue o mesmo princípio do enrolamento Tipo I, apenas alterando as formas de conexões e posicionamento das bobinas especiais, de forma a obter uma onda de indução na segunda polaridade com menor conteúdo harmônico.

Na Figura 4.14 é apresentada a onda de indução no entreferro para cada fase e para as três fases somadas no enrolamento originalmente de 8 pólos para o enrolamento Tipo II.

O enrolamento de 8 pólos deve ser comutado para um enrolamento de 10 pólos através da modulação. O processo de modulação é mostrado simplifiadamente na Figura 4.15. A curva (a), que é a onda de indução no entreferro devido aos enrolamentos da fase U, é modulada com uma onda retangular de 2 pólos de quatro níveis (b). Como resultado, se obteve no entreferro a onda de indução (c) devido à fase U modulada.

A onda de modulação é obtida da seguinte forma:

- o primeiro, o quarto, o quinto e o oitavo grupos de bobinas são extraídos *parcialmente* do circuito;
- o sexto e sétimo grupos de bobinas têm o sentido da corrente que passa por eles invertido.

Procurando obter uma maior simetria na onda de modulação, nos quatro grupos de bobinas especiais, duas das três bobinas que compõem o grupo são especiais e serão desconectadas no processo de modulação; a terceira bobina é igual às demais bobinas do enrolamento, permanecendo conectada ao circuito no processo de modulação. No primeiro e no quinto grupos de bobinas, as bobinas especiais serão as duas primeiras do grupo e a bobina normal será a terceira do grupo; e no quarto e oitavo grupos de bobinas, a bobina normal será a primeira do grupo e as bobinas especiais serão as duas últimas do grupo.

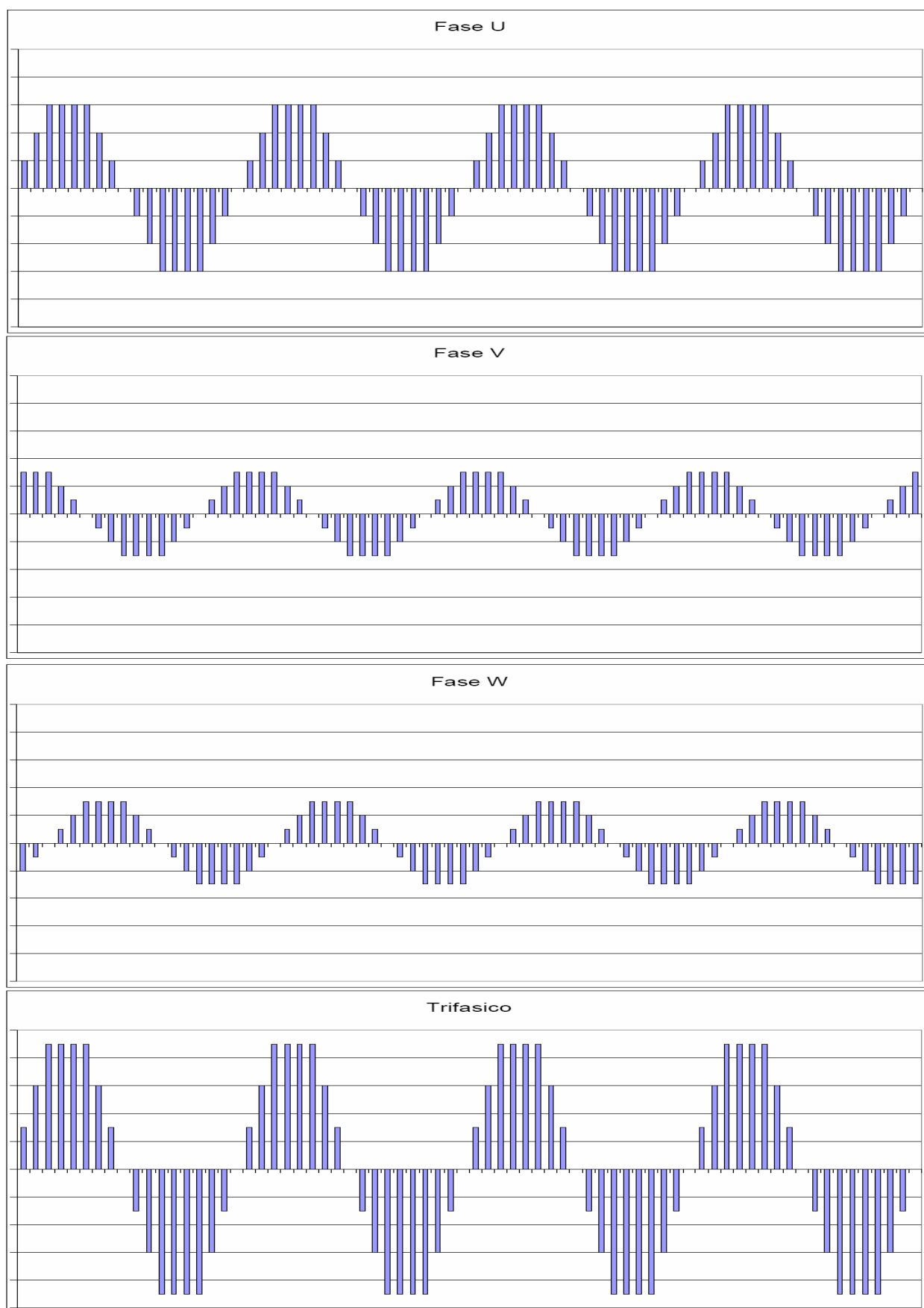


Figura 4.14 - Onda de indução no entreferro por fase e trifásico para o enrolamento tipo II na configuração 8 pólos.

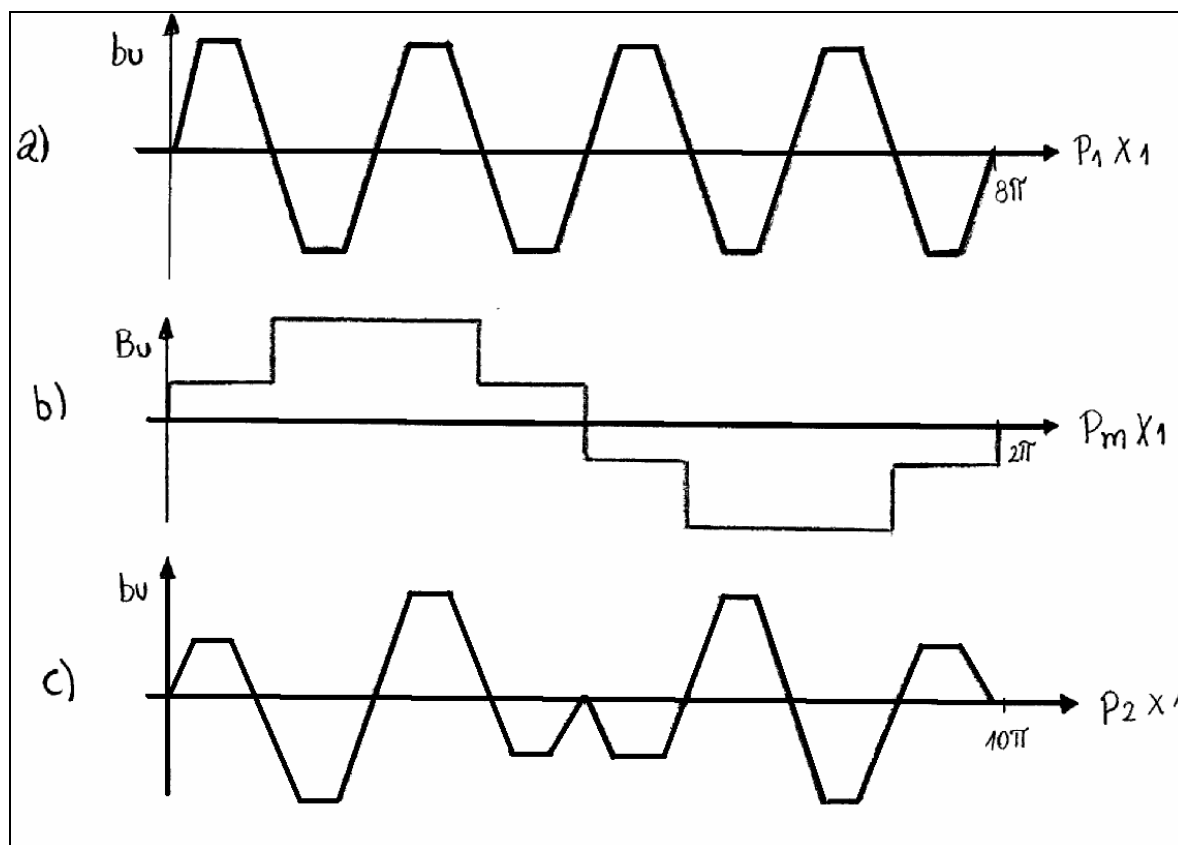


Figura 4.15 - Princípio de funcionamento do enrolamento tipo II.

Os inícios das fases deverão estar deslocados entre si de $a = \frac{2p}{3}$ graus mecânicos, que neste caso equivale a 24 ranhuras, de modo que a partir das três curvas das fases somadas no entreferro, a onda de 6 pólos gerada após a modulação irá se anular, restando apenas a onda de 10 pólos. Na Figura 4.18 é apresentada a onda de indução no entreferro para cada fase e para as três fases somadas no enrolamento após a modulação. É possível identificar os 10 pólos presentes na onda trifásica, e em comparação com a onda resultante do enrolamento Tipo I, apresentada na Figura 4.15, já é possível perceber uma redução no conteúdo harmônico, tendo a onda uma semelhança maior com um enrolamento puramente de 10 pólos.

Cada fase de um enrolamento PAM consiste de duas derivações iguais de enrolamento, que para o primeiro número de par de pólos são ligadas em paralelo, e para o segundo número de pares de pólos são ligadas em série. Assim, há a necessidade de apenas seis possibilidades de ligação para realizar a comutação de pólos. Desta forma, pode-se utilizar os mesmos equipamentos de comutação usados

nos motores Dahlander, como também foi o caso para o enrolamento do tipo I mostrado anteriormente.

A fase do enrolamento se divide depois das bobinas especiais em duas derivações paralelas, como pode ser visto nas Figura 4.8, Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11. Nestas bobinas especiais do enrolamento, circula corrente duas vezes maior do que a corrente que circula nas outras bobinas. Como devem gerar o mesmo número de Ampères-espiras, estas bobinas devem ter metade das espiras das outras bobinas. E assim, com o objetivo de manter as mesmas perdas Joules das outras bobinas, deve-se dobrar a seção transversal.

Analisando as Figura 4.16 e Figura 4.17, é possível perceber visualmente que na transformação de 8 pólos para 10 pólos há uma redução na curva da força eletromotriz, e um aumento na dispersão. No entanto se compararmos a Figura 4.17 com a Figura 4.13, nota-se uma menor dispersão no diagrama.

Conforme procedimento apresentado no Anexo 1, o coeficiente de dispersão harmônica para a configuração de 8 pólos é $s_{d8P} = 1,41\%$, enquanto para a configuração de 10 pólos é $s_{d10P} = 4,53\%$.

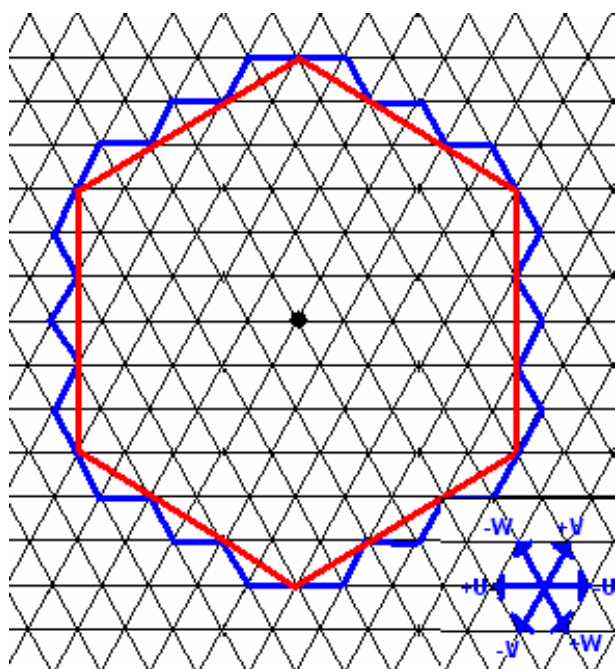


Figura 4.16 - Diagrama de Goerges para configuração 8 pólos para enrolamento tipo II.

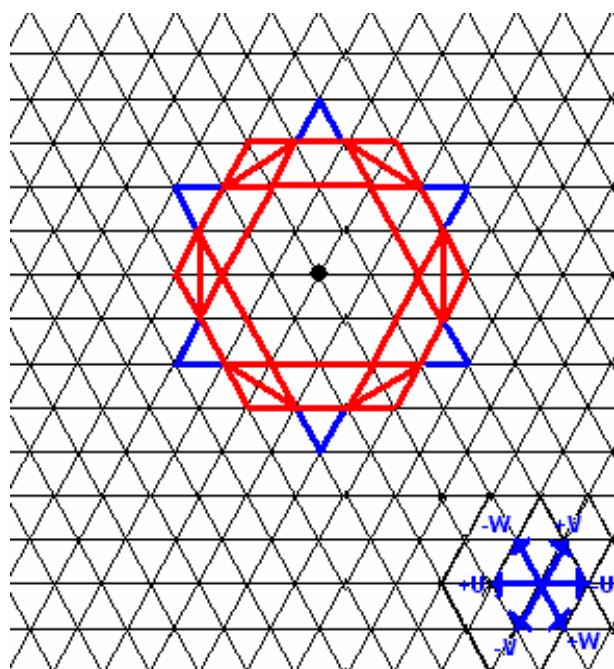


Figura 4.17 - Diagrama de Goerges para configuração 10 pólos para enrolamento tipo II.

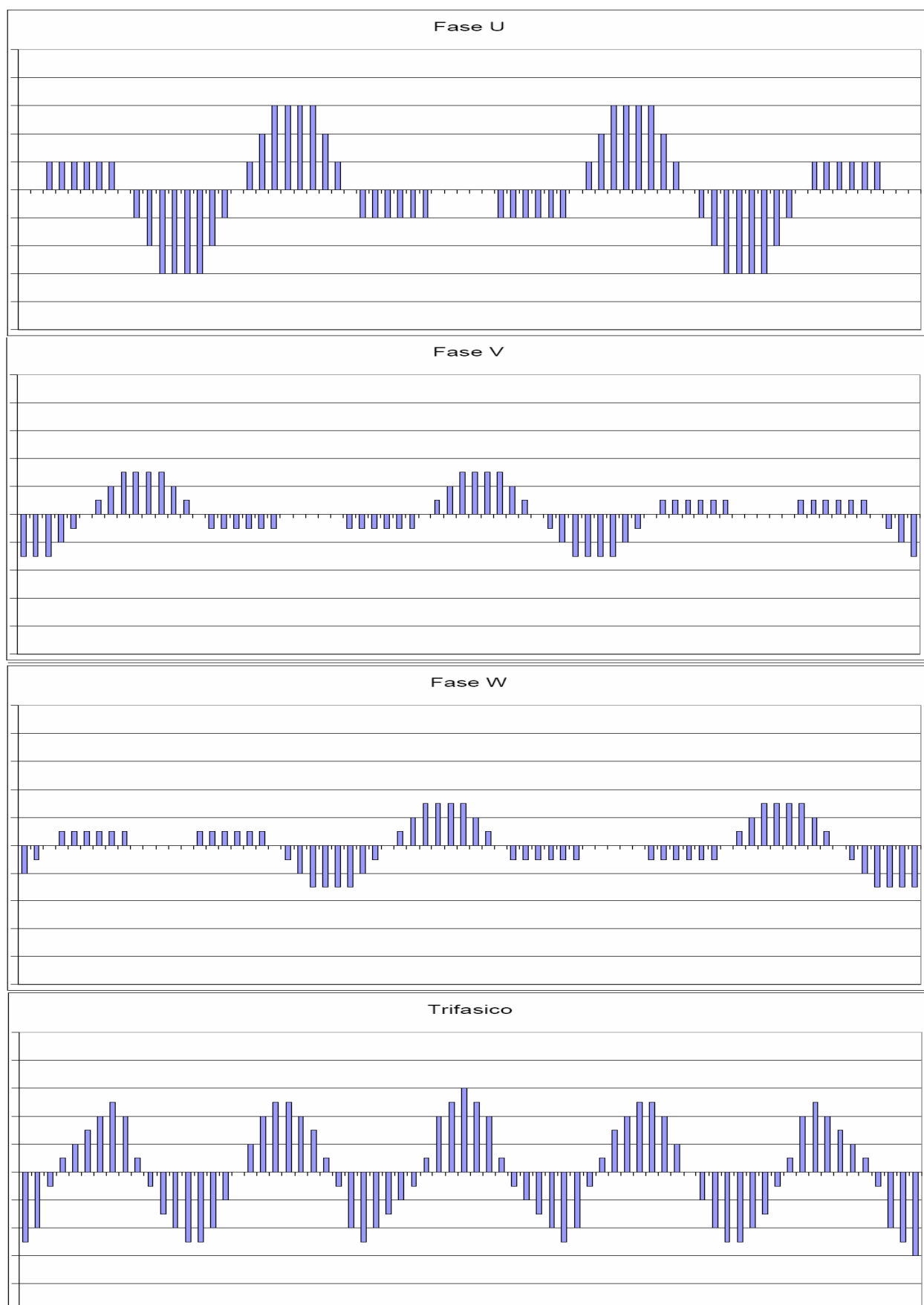


Figura 4.18 - Onda de indução no entreferro por fase e trifásico para o enrolamento tipo II na configuração 10 pólos.

4.6 CONCLUSÕES

Foi mostrado neste capítulo que após a modulação, o enrolamento gerará uma onda de indução com dois números de pólos. É através da distribuição dos enrolamentos das fases nas ranhuras que se garante que a polaridade indesejada se anule no entreferro.

Com base nisso foram apresentadas duas formas de se obter a onda de modulação: tipo I e tipo II.

Os coeficientes de dispersão harmônica dos enrolamentos tipo I e II mostram que o enrolamento PAM tipo II, após a modulação, se aproxima muito mais de uma forma de onda senoidal, por apresentar uma dispersão bastante reduzida. Por este motivo se espera que os ensaios do enrolamento tipo II apresentem perdas no ferro menores do que o enrolamento tipo I. Além disso, quando comparados os níveis de ruído e vibração dos protótipos com enrolamento tipo I e II, para uma mesma polaridade, espera-se que o enrolamento tipo II apresente índices menores, devido à menor dispersão harmônica.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de validar a teoria apresentada no capítulo 4, foram fabricados dois protótipos, um com enrolamento PAM tipo I e outro com enrolamento PAM tipo II. A finalidade dos estudos desenvolvidos neste trabalho são de verificar a possibilidade de mudança de velocidade através de um enrolamento, e realizar a comparação dos dois tipos de enrolamento PAM estudados.

Neste capítulo são apresentados os dados que foram necessários para a produção dos dois protótipos; e os resultados dos ensaios com eles realizados.

5.2 SELEÇÃO E PREPARAÇÃO DOS PROTÓTIPOS

Foi decidido que os protótipos do enrolamento PAM deveriam ser 8 / 10 pólos, pois esta é uma aplicação bastante comum na indústria.

Com base nisso, foram escolhidos dois motores de 6 pólos, carcaça IEC 160, com 72 ranhuras no estator. Um estator com este número de ranhuras poderia ser utilizado para o enrolamento PAM 8 / 10 pólos.

Assim, os dois motores foram reaproveitados, com exceção dos enrolamentos de 6 pólos, que em uma máquina foi substituído pelo enrolamento PAM tipo I, e na outra máquina pelo enrolamento PAM tipo II. Portanto, não foi feito um projeto procurando otimizar o desenho da chapa para uma configuração 8 / 10 pólos; foi utilizado um motor inicialmente projetado para 6 pólos e apenas trocado o enrolamento para obter a troca de polaridade. Em tese, o desempenho do PAM poderia ser

melhorado no caso de um projeto de chapa específico para esta aplicação. Segue na Figura 5.1 o desenho da chapa dos protótipos.

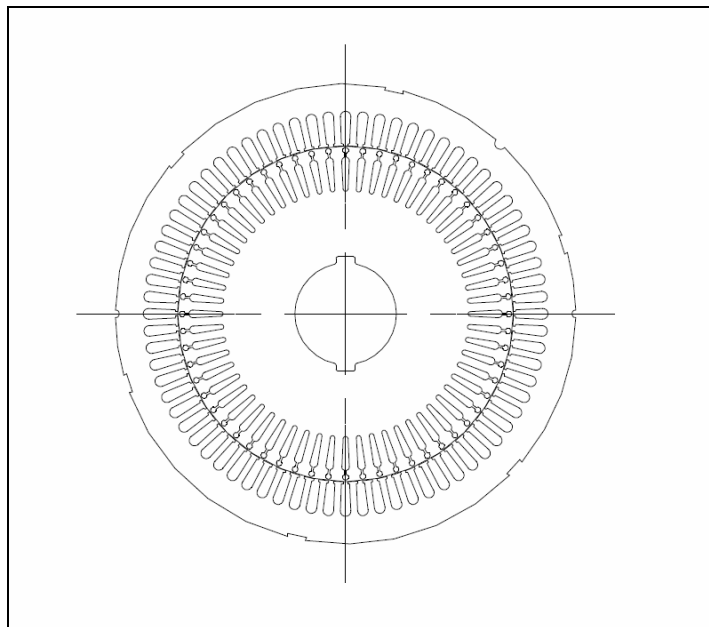


Figura 5.1 - Desenho do estator e rotor dos protótipos.

Para poder trabalhar com os estatores das máquinas, eles foram removidos das carcaças, e os enrolamentos de 6 pólos foram removidos dos estatores. Na Figura 5.2 é possível ver o estator ainda na carcaça sem o enrolamento do estator e sem o rotor.

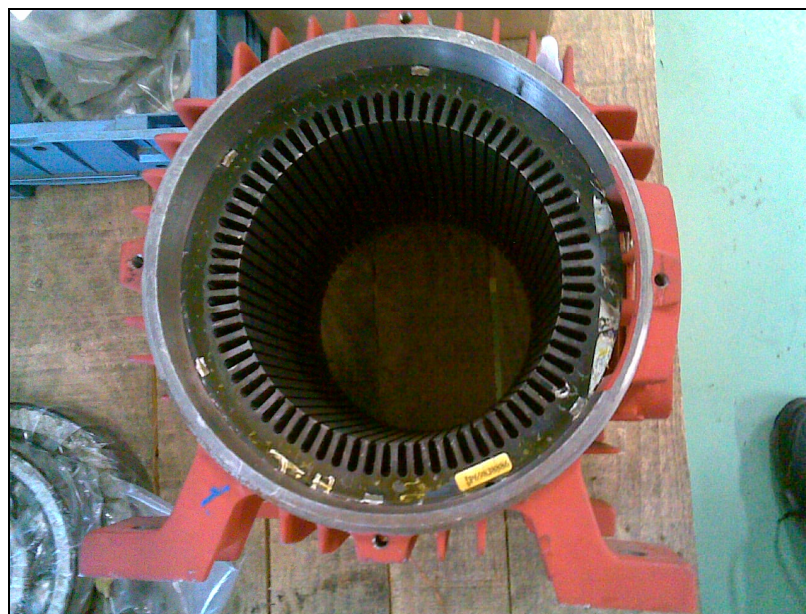


Figura 5.2 - Estator após extração do enrolamento de 6 pólos.

Segue na Tabela 2 os dados nominais dos prototipos realizados.

Tabela 2 - Dados nominais dos protótipos PAM.

Dados nominais		
Carcaça	IEC160 aletada	
Polaridade	8	10
Potência (kW)	10	6.4
Tensão de fase (V)	380	380
Frequência (Hz)	60	60

5.3 BOBINAGEM DOS PROTÓTIPOS

De posse do estator desbobinado, foram utilizados quatro esquemas de bobinagem e ligação, dois do enrolamento PAM tipo I, e outro do enrolamento PAM tipo II; e para cada tipo de enrolamento, um esquema para a configuração de 8 pólos, e outro para a configuração de 10 pólos.

Nas Figura 5.3 e Figura 5.4 estão apresentados os esquemas de bobinagem e ligação do enrolamento PAM tipo I, para a configuração de 8 e 10 pólos, respectivamente; Do mesmo modo, nas Figura 5.5 e Figura 5.6 estão apresentados os esquemas de bobinagem e ligação do enrolamento PAM tipo II, para as configurações de 8 e 10 pólos, respectivamente.

As características gerais destes enrolamentos são:

- Enrolamento Imbricado;
- 72 ranhuras;
- Camada Dupla;
- Passo do enrolamento = 1 : 7
- Espiras: Bobinas normais = 8
Bobinas especiais = 4
- Condutores: Bobinas normais = 2 x 0,80mm + 2 x 0,71mm
Bobinas especiais = 4 x 0,80mm + 4 0,71mm

- Comprimento de uma espira: 725mm
- Cabos de ligação: 9 x 12AWG

As linhas tracejadas da Figura 5.4 e Figura 5.6 indicam em quais ligações, após a mudança de velocidade, não haverá circulação de corrente, devido à desconexão de alguns grupos de bobinas especiais, que são os grupos em negrito.

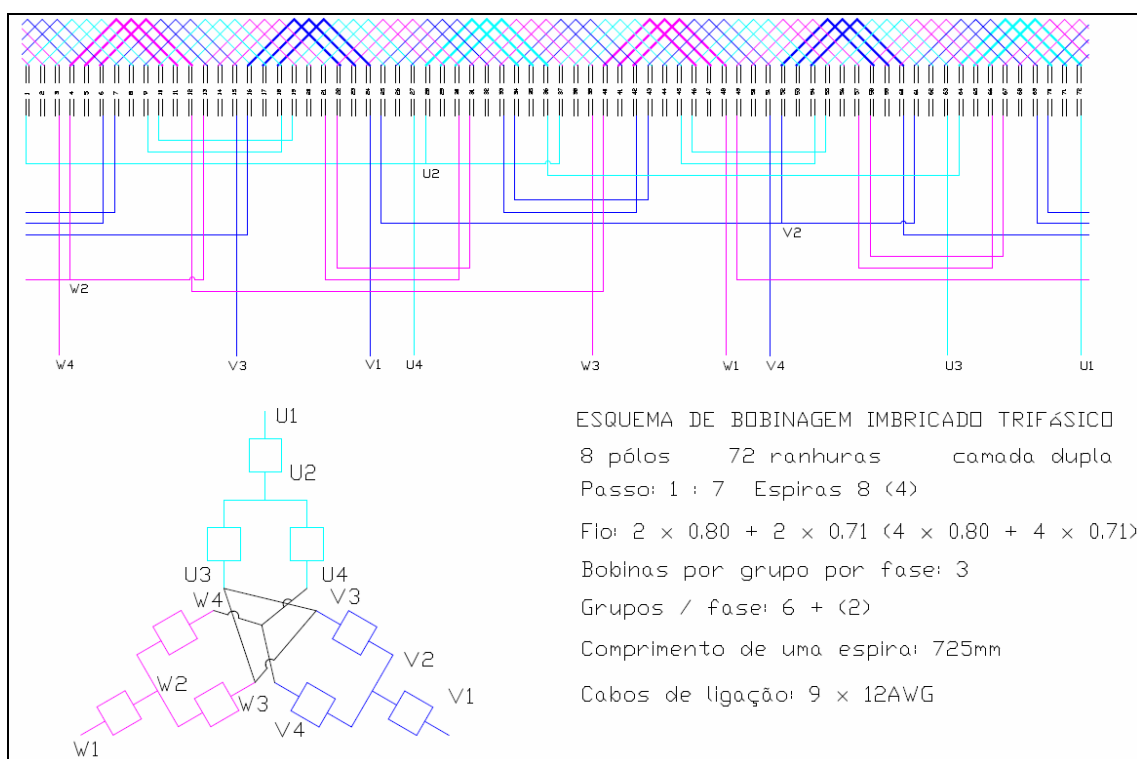


Figura 5.3 - Esquema de bobinagem e ligação para o enrolamento PAM tipo I em 8 pólos.

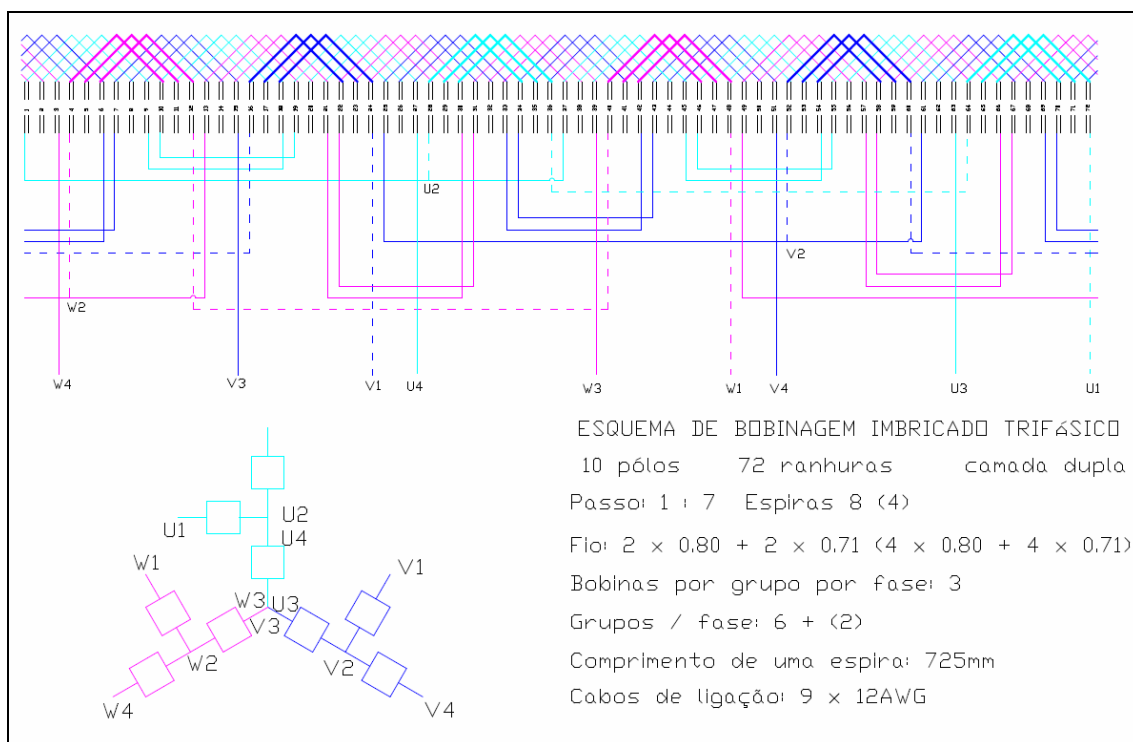


Figura 5.4 - Esquema de bobinagem e ligação para o enrolamento PAM tipo I em 10 pólos.

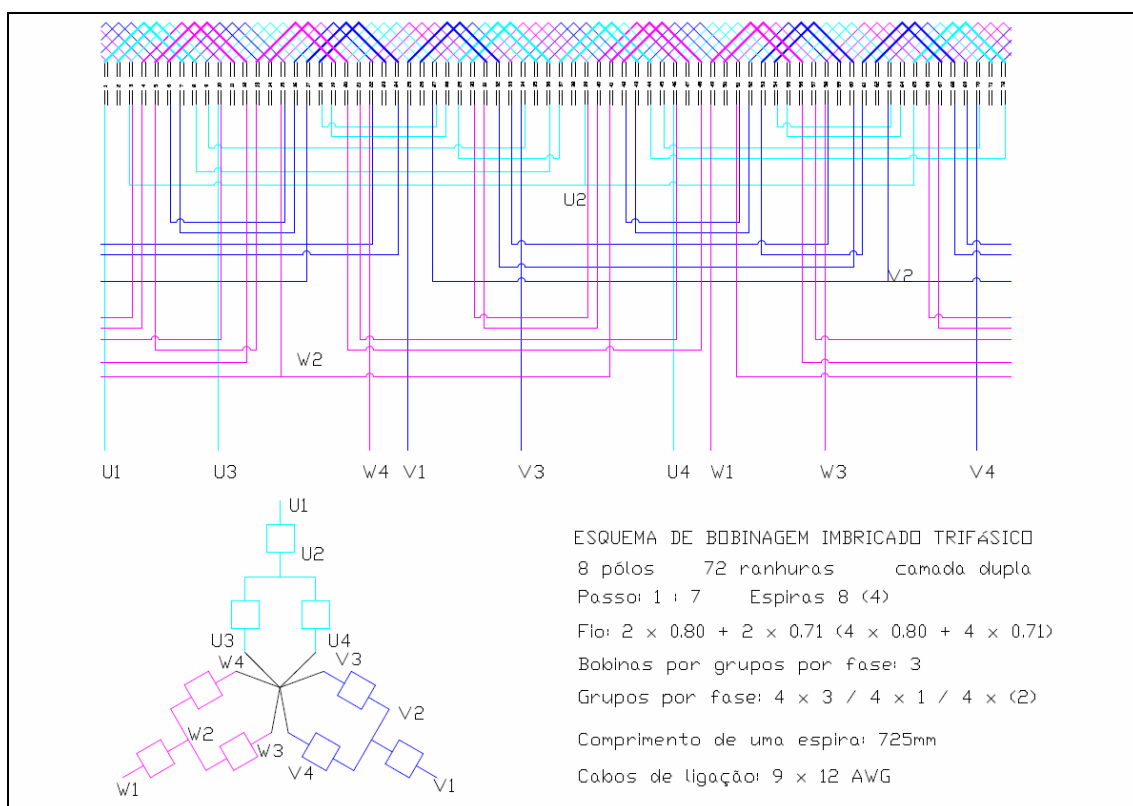


Figura 5.5 - Esquema de bobinagem e ligação para o enrolamento PAM tipo II em 8 pólos.

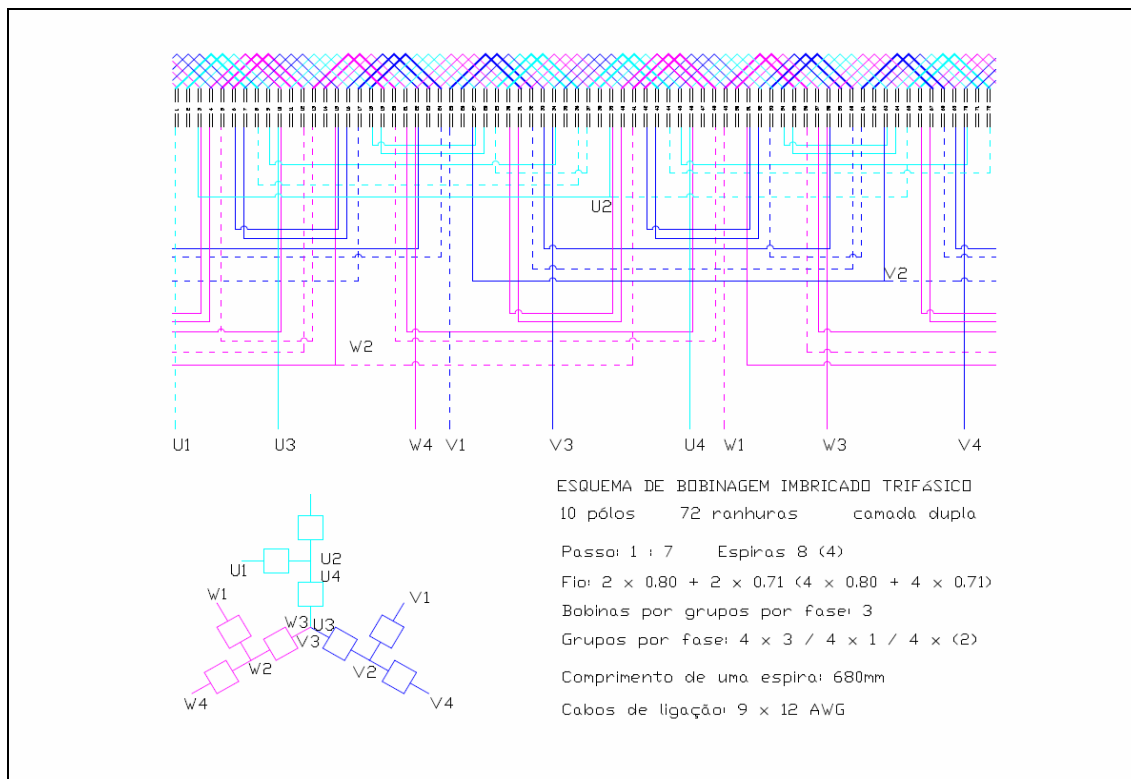


Figura 5.6 - Esquema de bobinagem e ligação para o enrolamento PAM tipo II em 10 pólos.

A bobinagem dos motores com enrolamento PAM é mais complicada do que os enrolamentos normais devido à existência de bobinas normais e especiais, que devem ser alojadas nas ranhuras corretas de modo a se obter a onda de indução desejada no entreferro. Até mesmo devido à inexperiência dos bobinadores neste tipo de enrolamento, a bobinagem foi um processo que mereceu bastante atenção. No caso de produção em série deste tipo de motor, deve-se considerar um tempo maior de bobinagem do PAM do que de motores de velocidade única, já que existem grupos de bobinas especiais que devem ser alojados nas ranhuras corretas, conforme especificação.

Para facilitar a identificação das bobinas normais e especiais na bobinagem, uma solução adotada foi utilizar condutores circulares com cores diferentes, onde para as bobinas normais foram utilizados fios com esmalte avermelhado, e nas bobinas especiais foram utilizados fios com esmalte esverdeado, conforme pode ser verificado na Figura 5.7.

Na Figura 5.8 pode-se ver as ligações das bobinas em um dos protótipos; e na Figura 5.9, o estator bobinado com as ligações já feitas.



Figura 5.7 - Fios de coloração diferente para facilitar a identificação.



Figura 5.8 - Ligações das bobinas sendo realizadas na fábrica.



Figura 5.9 – Estator bobinado.

5.4 ENSAIOS DOS PROTÓTIPOS

Os ensaios dos protótipos foram realizados no Laboratório de Ensaio da Fábrica IV da WEG Motores. A bancada utiliza um dinamômetro de 20kW, um analisador de potência NORMA D5255, e um sistema automatizado de aquisição de dados.

Na Figura 5.10 tem-se a foto de um dos protótipos acoplado ao dinamômetro, pronto para o ensaio e na Figura 5.11 a foto da bancada de aquisição de dados.



Figura 5.10 – Protótipo acoplado ao dinamômetro.



Figura 5.11 – Bancada de aquisição de dados.

Inicialmente havia a preocupação que os motores, após a modulação pudessem não operar na rotação desejada, devido a algum erro de bobinagem, uma vez que ninguém da seção de bobinagem tinha experiência em bobinar este tipo de enrolamento. No entanto, os dois protótipos operaram na rotação desejada, não sendo necessário nenhuma análise de erro.

Ambos os motores foram ensaiados em 60Hz e 380V.

Os relatórios dos ensaios realizados nos protótipos se encontram no Anexo 2.

5.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os ensaios apresentaram os dados esperados. Segue na Tabela 3 um resumo dos dados obtidos através dos ensaios dos protótipos.

Os dados de performance foram obtidos conforme NBR 5383 em plena carga. As velocidades de vibração foram medidas em 5 pontos, conforme NBR11390. Os relatórios completos dos ensaios encontram-se no Anexo 2.

Conforme era esperado, as perdas no ferro no protótipo com enrolamento PAM tipo I foram superiores às perdas encontradas no protótipo com enrolamento PAM tipo II, devido ao menor conteúdo harmônico na forma de onda da indução neste último. Este fato levou a condição do motor com enrolamento PAM tipo II apresentar um maior rendimento do que o PAM tipo I.

Como também foi comentado no Capítulo 4, os níveis de ruído e vibração foram inferiores no protótipo com enrolamento PAM tipo II.

Tabela 3 - Comparativo resumido dos ensaios.

DADOS DE ENSAIO	PAM Tipo I		PAM Tipo II	
Identificação				
Pólos:	8	10	8	10
Potência (kW):	10	6.4	10	6.4
Rotação (rpm):	880	695	880	697
Corrente (A):	30.6	22.97	30.77	23.21
Elevação de Temperatura pelo Método da Resistência (K):	101.1	140.0	102.8	136.5
Performance				
Ip/In:	5.65	3.53	5.5	3.72
Rendimento (%):	81.43	64.66	82.78	68.06
Fator de Potência:	0.610	0.656	0.598	0.619
Perdas no Ferro (W):	613.94	588.22	447.82	416.65
Ruído e Vibração				
Nível Global de Pressão Sonora dB(A):	67.6	77.8	55.3	67.3
Velocidade de Vibração (1)(mm/s rms):	1.1	1.0	0.4	1.0
Velocidade de Vibração (2)(mm/s rms):	1.1	1.0	0.3	0.7
Velocidade de Vibração (3)(mm/s rms):	1.8	0.5	0.5	0.4
Velocidade de Vibração (4)(mm/s rms):	1.8	2.0	0.3	0.9
Velocidade de Vibração (5)(mm/s rms):	1.8	1.6	0.3	0.9

Um resultado que chamou a atenção foi o fator de potência, que ficou mais baixo no PAM tipo II para a configuração de 10 pólos. Como não foi realizada nenhuma simulação das induções na chapa do motor, supõe-se que após a mudança da conexão, as induções para o enrolamento PAM tipo II, tenham ficado mais elevadas do que no enrolamento PAM tipo I, o que resultou num menor fator de potência do motor quando operando em 10 pólos.

Devido ao grau de complexidade para simular o protótipo em regime, para determinação das perdas, e posteriormente da temperatura, foram estimadas as potências que resultariam numa elevação de temperatura de 80 Kelvin (80 K). Esta

estimativa de carga foi bastante otimista, e como pode ser visto na Tabela 3, as máquinas tiveram elevação de temperatura superior a 100 Kelvin (100 K).

5.6 CONCLUSÕES

Os protótipos operaram da forma esperada, ambos operando nas rotações de 8 e 10 pólos.

Como era esperado, o protótipo com enrolamento PAM tipo II apresentou valores inferiores de perdas no ferro, ruído e vibração.

6 ANÁLISE DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DO PAM

6.1 INTRODUÇÃO

Apesar de pouco conhecido na indústria brasileira, o motor PAM é utilizado no exterior desde 1960 [2]. Devido a suas características de variação de velocidade, e da necessidade da redução da potência nas rotações inferiores, o PAM é melhor utilizado para cargas cujo torque resistente tem uma característica parabólica em função da rotação. Esta característica de torque resistente é bastante encontrada em cargas industriais (ventiladores, bombas centrífugas, compressores, etc...), o que torna o PAM uma boa opção de motor industrial. O objetivo será demonstrar uma maior eficiência energética através da variação da velocidade para este tipo de carga.

Conforme foi citado anteriormente, outros tipos de enrolamentos e acionamentos podem fornecer a variação de velocidade. No entanto, em muitos casos, o PAM é a alternativa economicamente mais viável.

6.2 MUDANÇA DE VELOCIDADE

Para realizar a mudança de velocidade, conforme apresentado no capítulo 4, é necessário alterar as conexões dos terminais do motor.

Nos protótipos, para alterar as conexões dos terminais, os motores foram inicialmente deserneizados, para então a troca das conexões serem feitas manualmente.

Numa aplicação industrial, o procedimento aplicado aos protótipos não é aceitável, devido ao tempo e trabalho necessário para fazer a mudança de polaridade. A forma mais utilizada para a mudança de polaridade de motores PAM são as chaves de mudança de polaridade a óleo de cinco pólos. Segue na Figura 6.1 o diagrama de conexão deste tipo de chave.

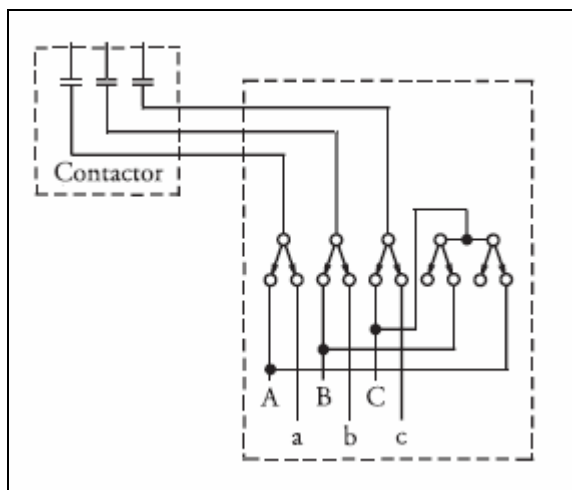


Figura 6.1- Diagrama de conexão da chave de mudança de velocidade.

As características de funcionamento desta chave são:

- Mudança de velocidade com o motor operando;
- O chaveamento não interrompe a corrente, não ocasionando surtos de tensão.

A partida do motor deverá ser realizada na maior polaridade (baixa rotação) devido à característica das maiores polaridades possuírem as menores correntes de partida, o que diminui a sobrecarga do sistema na partida.

6.3 CARGAS PARABÓLICAS

As cargas parabólicas são aquelas cuja curva de torque resistente em função da rotação apresenta uma característica quadrática, similar à apresentada na Figura 6.2.

Devido à desconexão de algumas bobinas durante a modulação, o torque deve ser reduzido para manter a elevação de temperatura constante. Por este motivo, o PAM é bem empregado para cargas parabólicas, pois estas apresentam um perfil que

atende esta necessidade de redução do torque em função da redução da velocidade. Para cargas que apresentam uma curva de torque resistente constante em função da variação da rotação, o PAM não é um motor indicado.

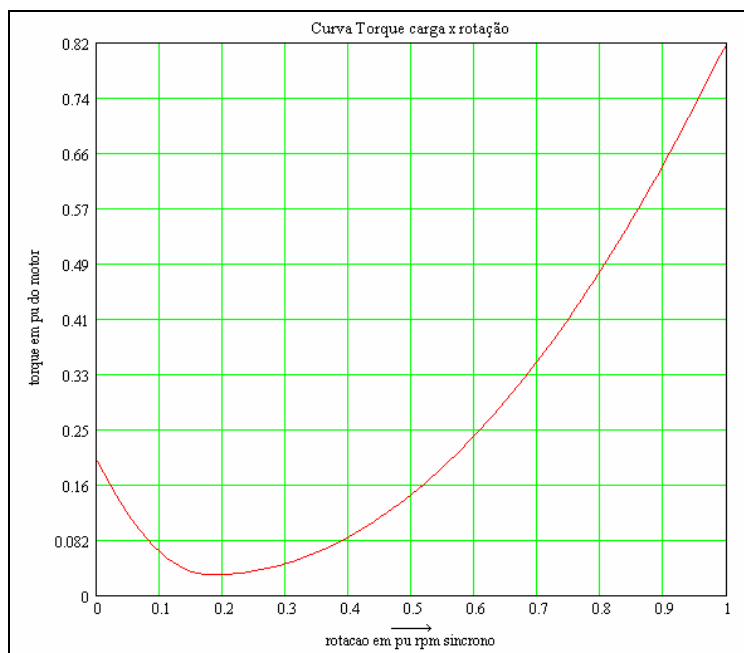


Figura 6.2 - Curva de torque resistente em função da rotação para cargas parabólicas.

A maior parte das máquinas que apresentam uma curva de torque resistente do tipo parabólica são *máquinas de fluxo*, como ventiladores e bombas, onde as condições da carga ditam esta vazão.

Os três métodos mais populares para variação do fluxo são: controle da válvula de descarga, controle do ângulo de ataque das pás (usado em ventiladores), e controle da velocidade.

Na Figura 6.3 são apresentadas curvas de potência absorvida em função da vazão de saída para um ventilador utilizando os três métodos de controle da vazão mencionados acima. Trata-se de curvas típicas retiradas de um catalogo da TECO-Westinghouse [2].

Considerando uma situação extrema como exemplo, para se obter uma vazão de 30% da vazão nominal, pelo método de controle do registro de descarga, a potência consumida pela carga é de 50% da potência nominal; pelo método do ângulo de ataque das pás, a potência consumida é de 30% da potência nominal; já pela variação da velocidade a potência consumida é de aproximadamente 3%.

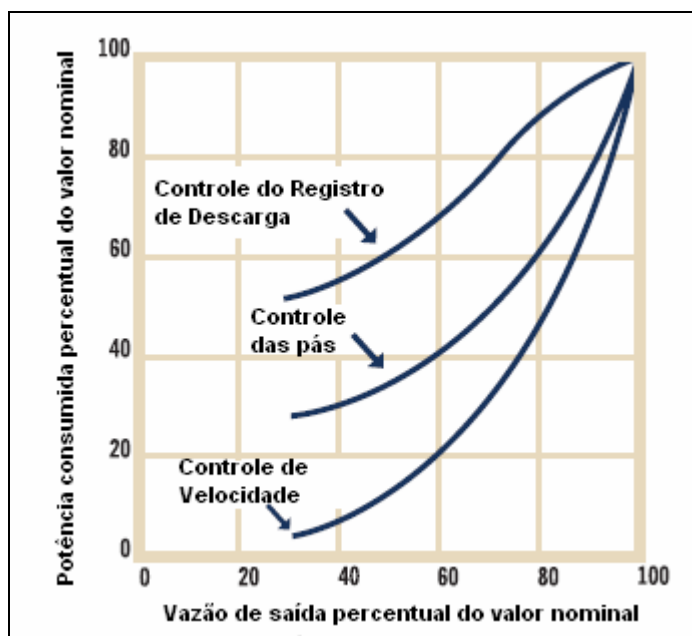


Figura 6.3 - Curvas típicas de potência consumida por ventiladores.

As curvas mostram que o método mais eficiente do ponto de vista energético é o controle da vazão através da rotação, e nestas aplicações, por exemplo, esta variação de velocidade pode ser oferecida pelo PAM.

6.4 COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS DE VARIAÇÃO DE VELOCIDADE

Para o motor obter as velocidades oferecidas pelo PAM, conforme citado anteriormente, os métodos mais usuais são o duplo enrolamento e o acionamento por inversor de frequência.

O método mais utilizado atualmente é o acionamento do motor por inversor de frequência. Neste método o motor poderá operar em uma faixa de velocidade, além de oferecer todo um controle do motor. Como desvantagem, grande parte dos inversores do mercado apresentam altos $\frac{dV}{dt}$, o que implica em um aumento do stress dielétrico dos materiais isolantes, resultando numa redução da vida útil do motor, além disso, muitos inversores de frequência apresentam uma queda de tensão, fazendo com que nos terminais do motor não chegue o mesmo valor da tensão da rede, o que resulta em sobre-aquecimento do motor.

Devido ao melhor aproveitamento do enrolamento do estator nas duas rotações, o PAM é mais econômico e compacto do que um motor com duplo enrolamento.

Com o objetivo de comparar os protótipos com um motor de duplo enrolamento para as mesmas condições de carga, procurou-se fazer o dimensionamento de um motor com enrolamento duplo.

De forma geral, os motores são dimensionados para uma elevação de temperatura de 80K em plena carga. No entanto, como pode ser visto na Tabela 3, os protótipos obtiveram elevações de temperatura superiores a 100K. Numa estimativa grosseira, utilizou-se uma fórmula prática bastante comum na indústria para obtenção da potência nominal que os protótipos poderiam fornecer, para obter uma elevação de temperatura estimada de 80K, com base na potência e na elevação de temperatura ensaiadas. A equação (72) é bastante simplificada e simples. Ela se baseia nas considerações de que a elevação de temperatura varia linearmente com as perdas; e estas, por sua vez, variam com o quadrado da corrente, ($Perdas = R \cdot I^2$); e que a corrente varia linearmente com a carga. Nesta fórmula também é desconsiderada a variação da resistência em função da temperatura, o que neste caso, torna a fórmula conservativa, já que os protótipos apresentaram elevações de temperatura acima dos 80K.

$$P_{estimada} = P_{ensaiada} \cdot \sqrt{\frac{\Delta T_{estimado}}{\Delta T_{ensaiado}}} \quad (72)$$

Assim, para 8 pólos a potência estimada foi de 8,83kW (12cv); e em 10 pólos foi estimada a potência de 4,9kW (6.7cv).

Para as condições de potência e polaridade citadas acima, foi solicitado à Engenharia de Motores Industriais da WEG Motores, para que fizesse o dimensionamento do motor utilizando duplo enrolamento. Segue na Tabela 4 alguns dados comparativos em termos de quantidade de materiais ativos empregados.

Analisando a Tabela 4, nota-se que o PAM utiliza 31,5% menos aço magnético bruto, e 34,9% menos cobre no estator. Além disso, houve uma redução na carcaça da IEC 200 para a IEC 160, o que equivale a uma redução de duas carcaças normalizadas. A redução de carcaça resulta numa maior flexibilidade física, maior compactação, menor peso, e menor custo. Além disso, apesar do maior grau de

dificuldade para se realizar as ligações de um enrolamento PAM, o custo do processo de bobinagem de um duplo enrolamento é maior, pois se trata da bobinagem de dois enrolamentos.

Tabela 4 – Comparativo de material ativo.

Dados	PAM	INDEP.
Potência (kW)	8.83 / 4.90	8.83 / 4.90
Polaridade	8 / 10	8 / 10
Carcaça	160	200
Frequencia (Hz)	60	60
Tensão nominal (V)	380	380
Aço Magnético Bruto (kg)	122	178
Cobre do estator (kg)	6.9	10.6 (6.0 / 4.6)

Atualmente, para os casos de baixa tensão, a solução para variação de velocidade mais utilizada é a de motor acionado por inversor de frequência. Na Tabela 5 é apresentada um comparativo de custo das opções de três métodos de variação de velocidade: PAM, Enrolamento Independente e Motor acionado por Inversor de frequência. Os custos apresentados são relativos, tomando como base o custo do PAM. O custo do PAM foi estimado, tomando como base um motor Dahlander com quantidade de material ativo similar aos protótipos.

Tabela 5 – Comparativo de custos.

Dados	PAM	INDEP.	Motor + Inversor
Potência (kW)	4.9 / 8.83	4.9 / 8.83	8.83
Polaridade	10 / 8	10 / 8	8
Carcaça	160	200	160
Frequencia (Hz)	60	60	60
Tensão nominal (V)	380	380	380
Custo inicial (P.U.)	1.00	1.64	1.21

O PAM possui um custo inicial estimado 21% menor do que a opção de motor acionado por inversor; e comparando o PAM com um motor de enrolamento independente, o PAM apresenta uma redução no custo de 64%.

Para casos de média tensão, entre 1000V e 6600V, a economia do PAM fica ainda maior. Devido ao aumento significativo nos custos dos inversores de média tensão, o custo do inversor chega ser o dobro do custo do motor.

Acima de 6600V, as chaves necessárias para fazer a mudança de polaridade do PAM também apresentam custos elevados, tornando o PAM uma alternativa menos viável.

No entanto, devido ao baixo rendimento do PAM, principalmente na polaridade modulada, esta vantagem econômica virá a ser minimizada ao longo do tempo devido a um maior consumo de energia elétrica.

6.5 CONCLUSÕES

O PAM é uma alternativa economicamente viável para cargas onde é necessária a variação de velocidade em duas polaridades discretas, especialmente cargas com uma curva de conjugado em função da rotação com característica parabólica.

A Tabela 6 faz um resumo das características dos métodos de variação de velocidade quanto à flexibilidade de se obter diferentes velocidades, a dificuldade de bobinagem do motor e um custo relativo das opções.

Tabela 6 – Tabela resumo.

	PAM	Dahlander	Independente	Motor + Inversor
Variação de velocidade	Flexível	Pouco Flexível	Flexível	Muito Flexível
Dificuldade Bobinagem	Alta	Média	Alta	Baixa
Custo	Baixo	Baixo	Alto	Alto

7 CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido demonstrou a teoria da modulação dos pólos, comprovando a viabilidade do uso do PAM na indústria. Envolveu um estudo aprofundado na área de enrolamentos, para uma compreensão do fenômeno da modulação dos pólos.

Um dos principais méritos desta dissertação foi o caráter de fixar o conhecimento sobre a tecnologia de modulação de pólos, a qual é utilizada por poucos fabricantes de motores elétricos, mas pouco conhecida pela indústria nacional. Com este estudo pode-se trabalhar com vários conceitos da bobinagem de máquinas elétricas

Este trabalho se aprofundou no estudo de dois tipos de enrolamento PAM, ambos para motores de 8 / 10 pólos. O primeiro tipo é modulado por uma onda de 2 pólos de três níveis; e o segundo tipo é modulado por uma onda de 2 pólos de quatro níveis.

Apesar de possuir uma bobinagem ligeiramente mais complexa, o enrolamento PAM tipo II, por possuir uma onda de modulação mais similar à uma senóide, apresentou na polaridade modulada uma onda no entreferro com menor conteúdo harmônico do que o enrolamento tipo I. Através do Diagrama de Goerges, pôde-se comprovar que a dispersão harmônica do enrolamento tipo II é menor do que o do tipo I.

Os dois protótipos atenderam ao seu objetivo principal, que era operar nas polaridades de 8 e 10 pólos. Além disso, os resultados dos ensaios dos protótipos comprovaram o menor conteúdo harmônico do enrolamento tipo II, o qual apresentou um menor nível de ruído e menor perda no ferro, quando comparados com os resultados de ensaio do protótipo com enrolamento tipo I.

Conforme o comparativo econômico realizado no capítulo 6, o PAM se apresenta como uma boa opção de variação de velocidade para motores de indução, especialmente para cargas industriais que possuem a curva de torque em função da rotação com característica parabólica.

7.1 OPORTUNIDADES FUTURAS

Apesar de se tratar de uma teoria desenvolvida na década de 1950, poucos trabalhos científicos foram apresentados nas últimas décadas. Ainda existem oportunidades para continuar e aprofundar o estudo realizado por esta dissertação. Três frentes de trabalho são propostas: implementação de um programa de cálculo de motores com enrolamento PAM; elaborar novas possibilidades de modulação; novas aplicações para o PAM.

Em relação à primeira frente, esta dissertação se limitou a solidificar o conceito da modulação de pólos, não tendo como objetivo determinar dados de performance de máquinas com enrolamento tipo PAM. Com isso, há a possibilidade de implementação de um cálculo, analítico ou numérico, que permita informar quais são as bobinas especiais e normais, e a partir destas informações realizar o cálculos dos dados de performance de um motor de indução, como corrente de partida, rendimento, fator de potência e torques.

Na segunda frente, com o conceito do PAM dominado, é possível desenvolver novos tipos de enrolamentos que permitam a modulação dos pólos de novas formas, com diferentes ondas de modulação, permitindo um melhor desempenho do enrolamento pós-modulação.

Na última frente, conhecendo algumas propriedades do PAM, pode-se verificar a possibilidade de usar este conceito para o benefício de novas condições de carga na indústria, como por exemplo, utilizar o PAM para partida de ventiladores de alta inércia, partindo inicialmente o motor na maior polaridade, e posteriormente chaveando para a menor polaridade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FILIPPO FILHO, G. *Motor de Indução*. São Paulo. Érica Ltda, 2002. 243p.
- [2] TECO-WESTINGHOUSE MOTOR COMPANY. *TECO-Westinghouse PAM Motor*. Round Rock, 2007.
- [3] RAWCLIFFE, G. H.; FONG, W.; BURBIDGE, R.F. *Induction-motor Speed-changing by Pole-amplitude Modulation*. IEEE, Paper No 2497 U (Aug.), 1958.
- [4] RAWCLIFFE, G. H.; FONG, W. *Speed-changing Induction Motors: Further Developments in Pole-amplitude Modulation*. IEEE, Paper No 3306U (Dec.), 1960.
- [5] RAWCLIFFE, G. H.; FONG, W. *Speed-changing Induction Motors: Reduction of Pole Number by Sinusoidal Pole-amplitude Modulation*. IEEE, Paper No 3487U4 (Oct.), 1961.
- [6] HENNING, B. *Polumschaltbare Kurzschlußläufer mit PAM-Wicklung*. Dissertação de mestrado. Universidade Técnica de Hannover, 1979.
- [7] KOSTENKO, M.; PIOTROVSKY, L. *Electrical Machines*. Moscow. Mir Publishers, 1977. 700p.
- [8] KOSOW, I. L. *Máquinas Elétricas e Transformadores*. Porto Alegre. Editora Globo, 1979. 632p.
- [9] VOGT, K. *Berechnung Elektrischer Maschinen*. Weinheim. VCH. 1996. 524p.
- [10] JORDÃO, R. G. *Máquinas Síncronas*. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos, 1980.

ANEXO 1 – DESENHO DO POLÍGONO DE GOERGES

O polígono de Goerges é utilizado para determinar a curva da força eletromotriz e o coeficiente de dispersão harmônica, também chamada de dispersão de dupla concatenação.

O polígono é desenhado na pressuposição das saídas das ranhuras serem extremamente estreitas. Seus pontos nos cantos representam as ranhuras.

MARCHA DE CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DO POLÍGONO DE GOERGES

Para um melhor entendimento do procedimento para determinação do polígono de Goerges, será utilizado um caso de um enrolamento dupla camada como exemplo.

Os dados preliminares deste enrolamento são os seguintes:

$$N_1 = 44 \text{ ranhuras}$$

$$q_1 = 4$$

$$t_{p1} = 12$$

$$t_{s1} = 10$$

$$2P_1 = 12$$

$$m_1 = 3$$

$$S = m.d.c. (144, 6) = 6$$

Desenhar plano de bobinagem

Para desenhar o Diagrama de Goerges, só é necessário representar uma fase no plano de bobinagem. A distribuição das demais fases é a mesma, apenas defasadas no espaço.

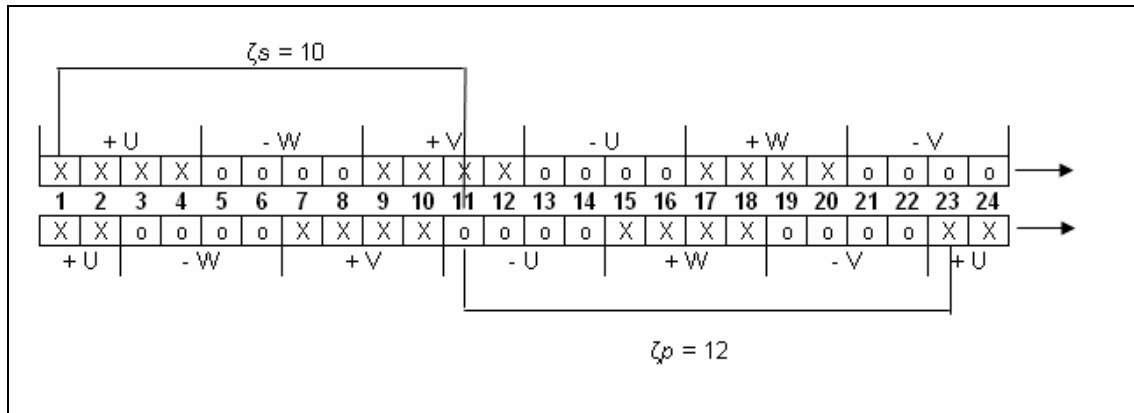


Figura 7.1 – Plano de bobinagem.

Desenhar polígono de Goerge

- Representar a força eletromotriz de ranhura;
- Determinar o centro de gravidade do polígono simétrico;
- Desenhar os raios do polígono de Goerges.

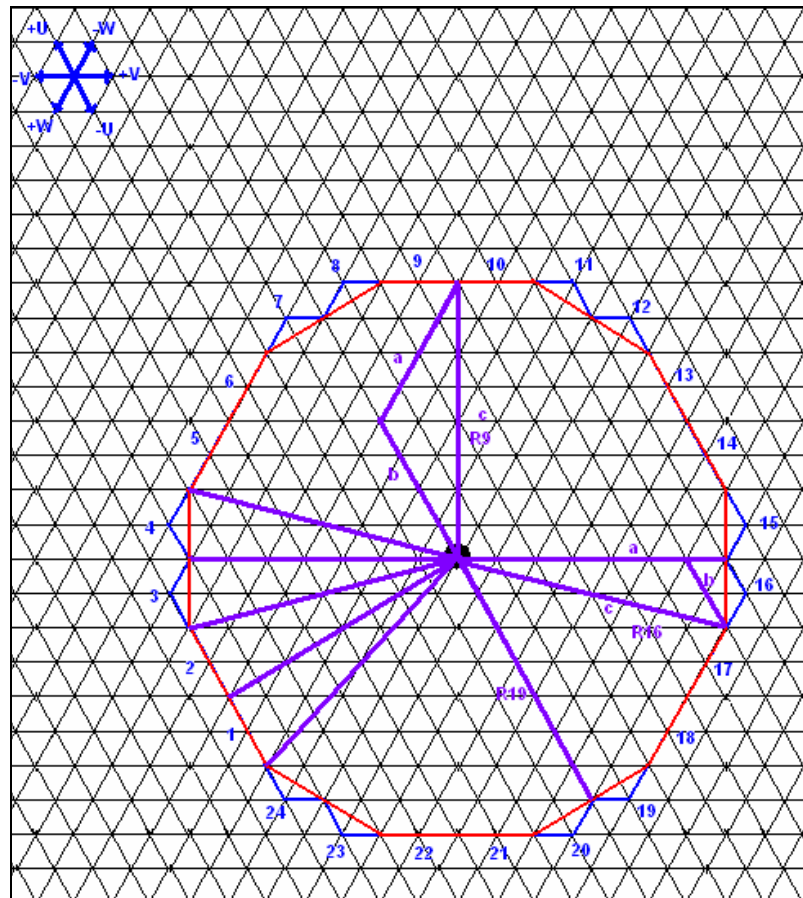


Figura 7.2 – Polígono de Goerges para o caso exemplo.

Calcular o comprimento dos raios do polígono de Goerges através da lei dos cossenos

Segue na equação (73) a lei dos cossenos

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos g \quad (73)$$

Recomenda-se a utilização de uma folha triangular para o calculo dos espaçamentos de tal modo que o ângulo oposto do lado desconhecido seja $g = 120^\circ$.

No exemplo dado, existem três raios diferentes no polígono:

$R9$, $R16$ e $R19$.

No total, são 6 x $R9$, 12 x $R16$ e 6 x $R19$.

$$R9 \begin{cases} a = 4 \\ b = 4 \end{cases}$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos g$$

$$R9^2 = 4^2 + 4^2 - 2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot (-0.5)$$

$$R9^2 = 32 + 16$$

$$R9^2 = 48$$

$$R16 \begin{cases} a = 2 \\ b = 6 \end{cases}$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos g$$

$$R16^2 = 2^2 + 6^2 - 2 \cdot 2 \cdot 6 \cdot (-0,5)$$

$$R16^2 = 40 + 12$$

$$R16^2 = 52$$

$$R19^2 = 7^2 = 49$$

Calcular A_1^2

$$A_1^2 = \frac{1}{N_p} \cdot \sum_{n=1}^{N_p} R_x^2 \quad (74)$$

Onde

- N_p : número de ranhuras da região de simetria
- R_x : raios do polígono de Goerges

No caso do exemplo dado:

$$A_1^2 = \frac{1}{N_p} \cdot \sum_{n=1}^{N_p} R_x^2$$

$$A_1^2 = \frac{1}{24} \cdot (6 \cdot 48 + 12 \cdot 52 + 6 \cdot 49)$$

$$A_1^2 = 50,25$$

Calcular o Fator de Enrolamento k_e

O Fator de Enrolamento é o Fator de Distribuição do Enrolamento k_d (24) multiplicado escalarmente pelo Fator de Encurtamento de Passo k_p (25), ambos detalhados no capítulo 2.

$$k_e = k_d \cdot k_p$$

$$k_e = \text{sen} \left(\frac{t_{s1}}{t_{p1}} \cdot \frac{p}{2} \right) \frac{\text{sen} \frac{p}{2 \cdot m_1}}{q \cdot \text{sen} \frac{p}{2 \cdot m_1 \cdot q}} \quad (75)$$

No caso do exemplo dado, $k_e = 0,92503065$.

Calcular $\sum passo$

No caso do exemplo dado, o polígono de Goerges é simétrico, portanto, entre todos os raios há sempre dois passos.

$$\sum passo = N1 \cdot passo = 144 \cdot 2 = 288 \quad (76)$$

Esta igualdade só é válida quando o número de passos entre todos os raios do polígono de Goerges é constante. Se o número de passos entre os raios não for constante, deve-se contá-los no polígono para cada período. Para obter o $\sum passo$, deve-se multiplicar o número de passos de um período pelo número de regiões de simetria t .

Calcular A_0^2

$$A_0 = \frac{k_e}{2pP} \cdot \sum passo \quad (77)$$

No caso do exemplo dado:

$$A_0 = \frac{k_e}{2pP} \cdot \sum passo$$

$$A_0 = \frac{0,92503065}{2p6} \cdot 288,$$

$$A_0 = 7,0667$$

$$A_0^2 = 49,93844$$

Calcular o coeficiente de dispersão harmônica S_d

$$S_d = \frac{A_1^2}{A_0^2} - 1 \quad (78)$$

No caso do exemplo dado:

$$S_d = \frac{A_1^2}{A_0^2} - 1$$

$$S_d = \frac{50,25}{49,93844} - 1$$

$$S_d = 0,624\%$$

Quanto mais a forma do polígono se aproximar de um círculo, tanto menor será a dispersão harmônica S_d .

O polígono se fecha, pelo menos, uma vez ao percorrer o enrolamento.

DIAGRAMA DE GOERGES APLICADO PARA O ENROLAMENTO TIPO PAM

O diagrama de Goerges pode ser utilizado como uma ferramenta para analisar o enrolamento do tipo PAM. Com ela pode-se comparar a dispersão harmônica entre os tipos de enrolamentos PAM, e verificar qual gera uma menor dispersão.

A marcha de cálculo para determinação do polígono de Goerges que foi apresentada acima pode ser utilizada para os enrolamentos do tipo PAM.

A única ressalva que se faz é quanto ao Fator de Distribuição k_d , que não pode ser determinado pela equação (24) para a polaridade obtida após a modulação, pois após a modulação algumas bobinas são desconectadas.

Para calcular o Fator de Distribuição do Enrolamento k_d na situação após a modulação deve-se utilizar a seguinte fórmula:

$$k_d = \frac{\left[\sum_{n=0}^{N_1} i_n \cdot \cos(\Delta_n) \right]^2}{\left[\sum_{n=0}^{N_1} i_n \cdot \sin(\Delta_n) \right]^2} \quad (79)$$

Onde

- i_n : escalar unitário que indica o sentido da corrente da fase na ranhura n
- Δ_n : ângulo elétrico, em radianos, da ranhura n .

Se na ranhura n a corrente de determinada fase estiver entrando no plano de bobinagem, $i_n=1$; se na ranhura n a corrente de determinada fase estiver saindo no plano de bobinagem, $i_n = -1$; e se na ranhura n não houver corrente de determinada fase, então $i_n = 0$.

Apesar de ser mais trabalhosa do que a equação(24), a equação (79) pode ser aplicada a qualquer caso.

CÁLCULO DO DIAGRAMA DE GOERGES PARA O ENROLAMENTO PAM TIPO I COM 72 RANHURAS NO ESTATOR

CÁLCULO PARA A CONFIGURAÇÃO DE 8 PÓLOS

Características do enrolamento analisado:

- $N_1 = 72$ ranhuras
- $q_1 = 3$
- $t_{p1} = 9$
- $t_{s1} = 6$
- $2P_1 = 8$
- $m_1 = 3$

- $S = m.d.c. (72, 4) = 4$

Plano de bobinagem da fase R para a configuração de 8 pólos conforme Figura 7.3.

8 pólos - fase R

Ranhura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Topo ranhura	X	X	X							O	O	O						X	X	X						O	O	O				
Fundo ranhura								O	O	O						X	X	X								O	O	O				
Ranhura	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68
Topo ranhura	X	X	X							O	O	O						X	X	X							O	O	O			
Fundo ranhura								O	O	O						X	X	X								O	O	O				

Figura 7.3 – Plano de bobinagem da fase R para o enrolamento PAM tipo I em 8 pólos.

Desenho do polígono de Goerges

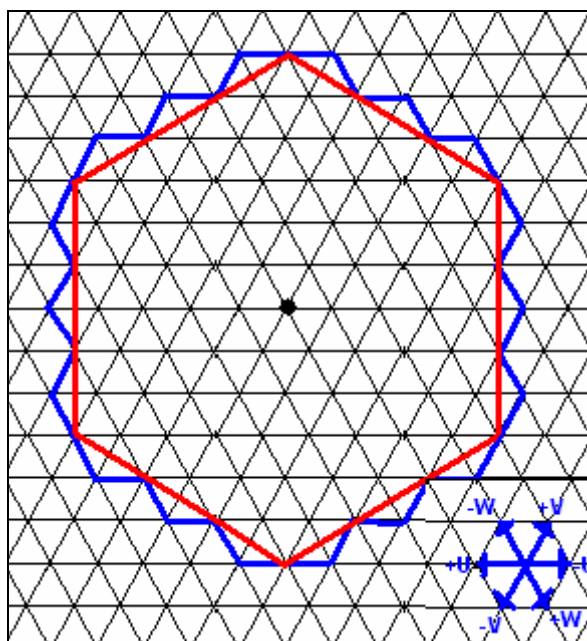


Figura 7.4 - Polígono de Goerges para o enrolamento PAM Tipo I em 8 pólos.

Cálculo do comprimento dos raios do polígono de Goerges através da lei dos cossenos

Raios: R1 e R3.

No total, são 12 x R1, 6 x R3.

$$R1 \begin{cases} a = 1 \\ b = 4 \end{cases}$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos g$$

$$R1^2 = 1^2 + 4^2 - 2 \cdot 1 \cdot 4 \cdot (-0,5)$$

$$R1^2 = 17 + 4$$

$$R1^2 = 21$$

$$R3 \begin{cases} a = 3 \\ b = 3 \end{cases}$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos g$$

$$R3^2 = 3^2 + 3^2 - 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot (-0,5)$$

$$R3^2 = 18 + 9$$

$$R3^2 = 27$$

Cálculo A_1^2

$$A_1^2 = \frac{1}{N_p} \cdot \sum_{n=1}^{N_p} R_x^2$$

$$A_1^2 = \frac{1}{18} \cdot (12 \cdot 21 + 6 \cdot 27)$$

$$A_1^2 = 23$$

Cálculo do Fator de Enrolamento k_e

$$k_e = k_d \cdot k_p$$

$$k_e = \text{sen} \left(\frac{t_{s1}}{t_{p1}} \cdot \frac{p}{2} \right) \frac{\text{sen} \frac{p}{2 \cdot m_1}}{q \cdot \text{sen} \frac{p}{2 \cdot m_1 \cdot q}}$$

$$k_e = 0,8312$$

Cálculo \sum_{passo}

$$\sum_{passo} = N1 \cdot passo = 72 \cdot 2 = 144$$

Cálculo A_0^2

$$A_0 = \frac{k_e}{2pP} \cdot \sum passo$$

$$A_0 = \frac{0.8312}{2p4} \cdot 144$$

$$A_0 = 4,76$$

$$A_0^2 = 22,681$$

Cálculo do coeficiente de dispersão harmônica S_{d8P}

$$S_d = \frac{A_1^2}{A_0^2} - 1$$

$$S_{d8P} = 1,41\%$$

CÁLCULO PARA A CONFIGURAÇÃO DE 10 PÓLOS

Características do enrolamento analisado:

- $N_1 = 72$ ranhuras
- $q_1 = 24$
- $t_{p1} = 36/5$
- $t_{s1} = 6$
- $2P_1 = 10$
- $m_1 = 3$
- $S = m.d.c. (72, 5) = 1$

Plano de bobinagem da fase R para a configuração de 10 pólos conforme Figura 7.5

10 pólos																																
Ranhura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Topo ranhura	-	-	X							O	O	O							X	X	X							O	-	-		
Fundo ranhura							-	-	O							X	X	X							O	O	O					
Ranhura	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68
Topo ranhura	-	-	O							X	X	X							O	O	O							X	-	-		
Fundo ranhura							-	-	X							O	O	O							X	X	X					

Figura 7.5 - Plano de bobinagem da fase R para o enrolamento PAM tipo I em 10 pólos.

Desenho do polígono de Goerges

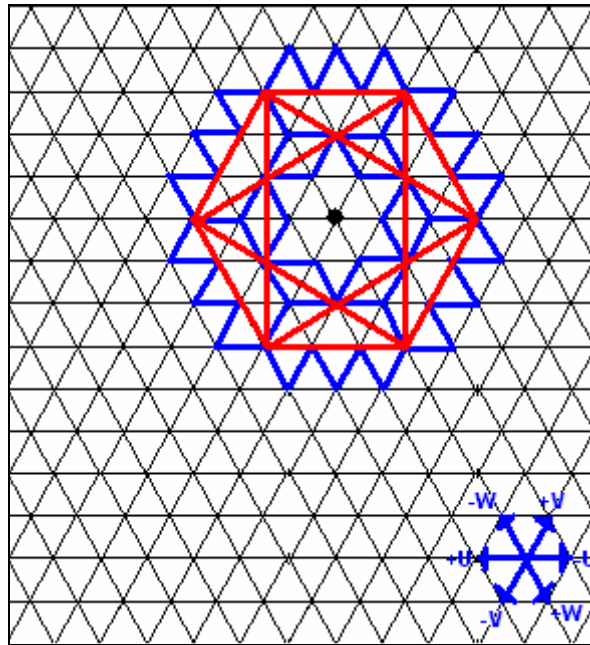


Figura 7.6 - Polígono de Goerges para o enrolamento PAM Tipo I em 10 pólos

Cálculo do comprimento dos raios do polígono de Goerges através da lei dos cossenos

Raios: $R1$, $R2$ e $R3$.

No total, são 12 x $R1$, 24 x $R2$ e 36 x $R3$.

$$R1 \begin{cases} a = 1 \\ b = 1 \end{cases}$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos g$$

$$R1^2 = 1^2 + 1^2 - 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot (-0,5)$$

$$R1^2 = 2 + 1$$

$$R1^2 = 3$$

$$R2 = 3^2 = 9$$

$$R3 \begin{cases} a = 2 \\ b = 1 \end{cases}$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos g$$

$$R3^2 = 2^2 + 1^2 - 2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot (-0,5)$$

$$R3^2 = 5 + 2$$

$$R3^2 = 7$$

Cálculo A_1^2

$$A_1^2 = \frac{1}{N_p} \cdot \sum_{n=1}^{N_p} R_x^2$$

$$A_1^2 = \frac{1}{72} \cdot (12 \cdot 3 + 9 \cdot 24 + 7 \cdot 36)$$

$$A_1^2 = 7$$

Cálculo do Fator de Enrolamento k_e

Através da equação (79), calcula-se o fator de enrolamento.

$$k_d = \frac{\sqrt{\left[\sum_{n=0}^{N_1} i_n \cdot \cos(\Delta_n) \right]^2}}{\sqrt{\left[\sum_{n=0}^{N_1} i_n \cdot \text{sen}(\Delta_n) \right]^2}}$$

$$k_e = 0,7288$$

Cálculo $\sum passo$

$$\sum passo = N_1 \cdot passo = 36 \cdot 1 + 36 \cdot 2 = 108$$

Cálculo A_0^2

$$A_0 = \frac{k_e}{2pP} \cdot \sum passo$$

$$A_0 = \frac{0,7288}{2p5} \cdot 108$$

$$A_0 = 2,505$$

$$A_0^2 = 6,2771$$

Cálculo do coeficiente de dispersão harmônica S_{d10P}

$$S_d = \frac{A_1^2}{A_0^2} - 1$$

$$S_{d10P} = 11,515\%$$

CÁLCULO DO DIAGRAMA DE GOERGES PARA O ENROLAMENTO PAM TIPO II COM 72 RANHURAS NO ESTATOR

CÁLCULO PARA A CONFIGURAÇÃO DE 8 PÓLOS

O cálculo para a configuração de 8 pólos do tipo II é idêntico ao tipo I, apresentado acima.

CÁLCULO PARA A CONFIGURAÇÃO DE 10 PÓLOS

Características do enrolamento analisado:

- $N_1 = 72$ ranhuras
- $q_1 = 24$
- $t_{p1} = 36/5$
- $t_{s1} = 6$
- $2P_1 = 10$
- $m_1 = 3$
- $S = m.d.c. (72, 5) = 1$

Plano de bobinagem da fase R para a configuração de 10 pólos conforme Figura 7.5

10 pólos - fase R

Ranhura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Topo ranhura	X	X	X							O	O	O							X	X	X							-	-	-		
Fundo ranhura							O	O	O								X	X	X						O	O	O					
Ranhura	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68
Topo ranhura	O	O	O							X	X	X							O	O	O							-	-	-		
Fundo ranhura							X	X	X								O	O	O						X	X	X					

Figura 7.7 - Plano de bobinagem da fase R para o enrolamento PAM tipo II em 10 pólos.

Desenho do polígono de Goerges

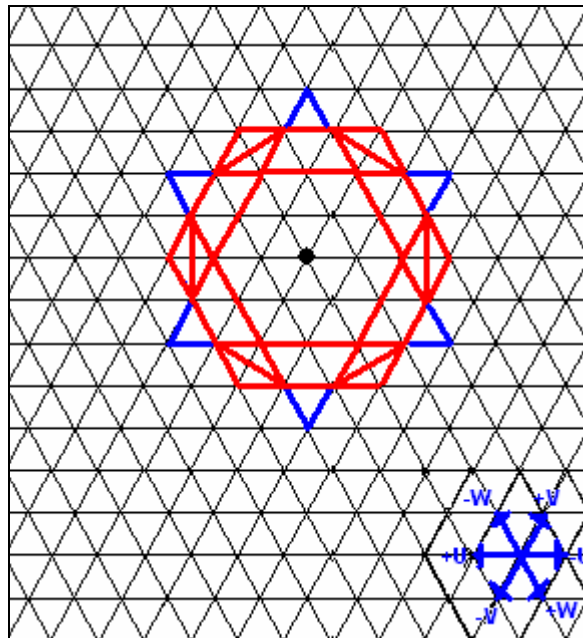


Figura 7.8 - Polígono de Goerges para o enrolamento PAM Tipo II em 10 pólos

Cálculo do comprimento dos raios do polígono de Goerges através da lei dos cossenos

Raios: $R1$, $R2$, $R3$ e $R4$.

No total, são 6 x $R1$, 48 x $R2$, 12 x $R3$ e 6 x $R4$.

$$R1^2 = 3^2 = 9$$

$$R2 \begin{cases} a = 1 \\ b = 2 \end{cases}$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos g$$

$$R2^2 = 2^2 + 1^2 - 2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot (-0,5)$$

$$R2^2 = 5 + 2$$

$$R2^2 = 7$$

$$R3^2 = 2^2 = 4$$

$$R4 \begin{cases} a = 1 \\ b = 1 \end{cases}$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos g$$

$$R4^2 = 1^2 + 1^2 - 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot (-0,5)$$

$$R4^2 = 2 + 1$$

$$R4^2 = 3$$

Cálculo A_1^2

$$A_1^2 = \frac{1}{N_p} \cdot \sum_{n=1}^{N_p} R_x^2$$

$$A_1^2 = \frac{1}{72} \cdot (6 \cdot 9 + 48 \cdot 7 + 12 \cdot 4 + 6 \cdot 3)$$

$$A_1^2 = 6,333$$

Cálculo do Fator de Enrolamento k_e

Através da equação (79), calcula-se o fator de enrolamento.

$$k_d = \sqrt{\frac{\left[\sum_{n=0}^{N_1} i_n \cdot \cos(\Delta_n) \right]^2}{\left[\sum_{n=0}^{N_1} i_n \cdot \text{sen}(\Delta_n) \right]^2}}$$

$$k_e = 0,8055$$

Cálculo $\sum passo$

$$\sum passo = N1 \cdot passo = 48 \cdot 1 + 24 \cdot 2 = 96$$

Cálculo A_0^2

$$A_0 = \frac{k_e}{2pP} \cdot \sum passo$$

$$A_0 = \frac{0,8055}{2p5} \cdot 96$$

$$A_0 = 2,461$$

$$A_0^2 = 6,0586$$

Cálculo do coeficiente de dispersão harmônica S_{d10P}

$$S_d = \frac{A_1^2}{A_0^2} - 1$$
$$S_{d10P} = 4,53\%$$

ANEXO 2 – RELATÓRIOS DE ENSAIO

Seguem nas figuras apresentadas abaixo, os relatórios dos ensaios feitos pelo Laboratório de Ensaio da Fábrica IV da WEG Motores nos protótipos.

Nestes relatórios destacam-se as seguintes informações:

- P_{fe} (W): perdas no ferro em Watts
- N (%): rendimento percentual do motor
- RPM : rotação do motor por minuto
- DT . *Bobina*: elevação de temperatura da bobina em Kelvin
- C_p/C_n : conjugado de partida em p.u.
- C_{max}/C_n : conjugado máximo em p.u.
- I_p/I_n : corrente de partida em p.u.
- Nível global de pressão sonora em dB(A)
- Velocidade de vibração em mm/s rms

PROTÓTIPO DO ENROLAMENTO PAM TIPO I

Na Figura 7.9 e na Figura 7.10 são apresentados os relatórios de ensaio de performance do protótipo PAM tipo I na configuração de 8 pólos e 10 pólos respectivamente.

Na Figura 7.11 e na Figura 7.12 são apresentados os relatórios de ensaio de ruído do protótipo PAM tipo I na configuração de 8 pólos e 10 pólos respectivamente.

Na Figura 7.13 e na Figura 7.14 são apresentados os relatórios de ensaio de vibração do protótipo PAM tipo I na configuração de 8 pólos e 10 pólos respectivamente.

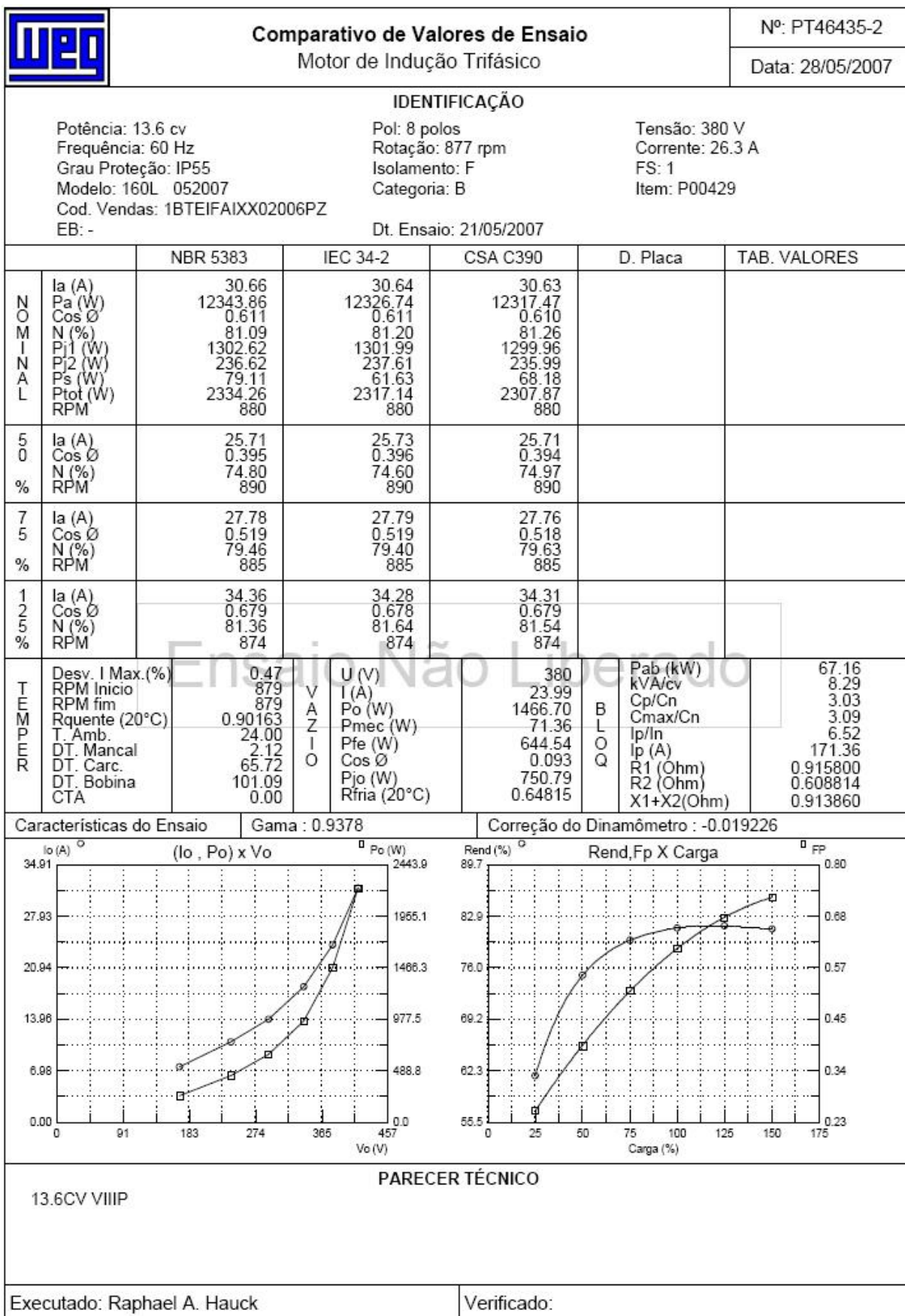


Figura 7.9 – Relatório de ensaio de performance do enrolamento PAM Tipo I na configuração de 8 pólos.

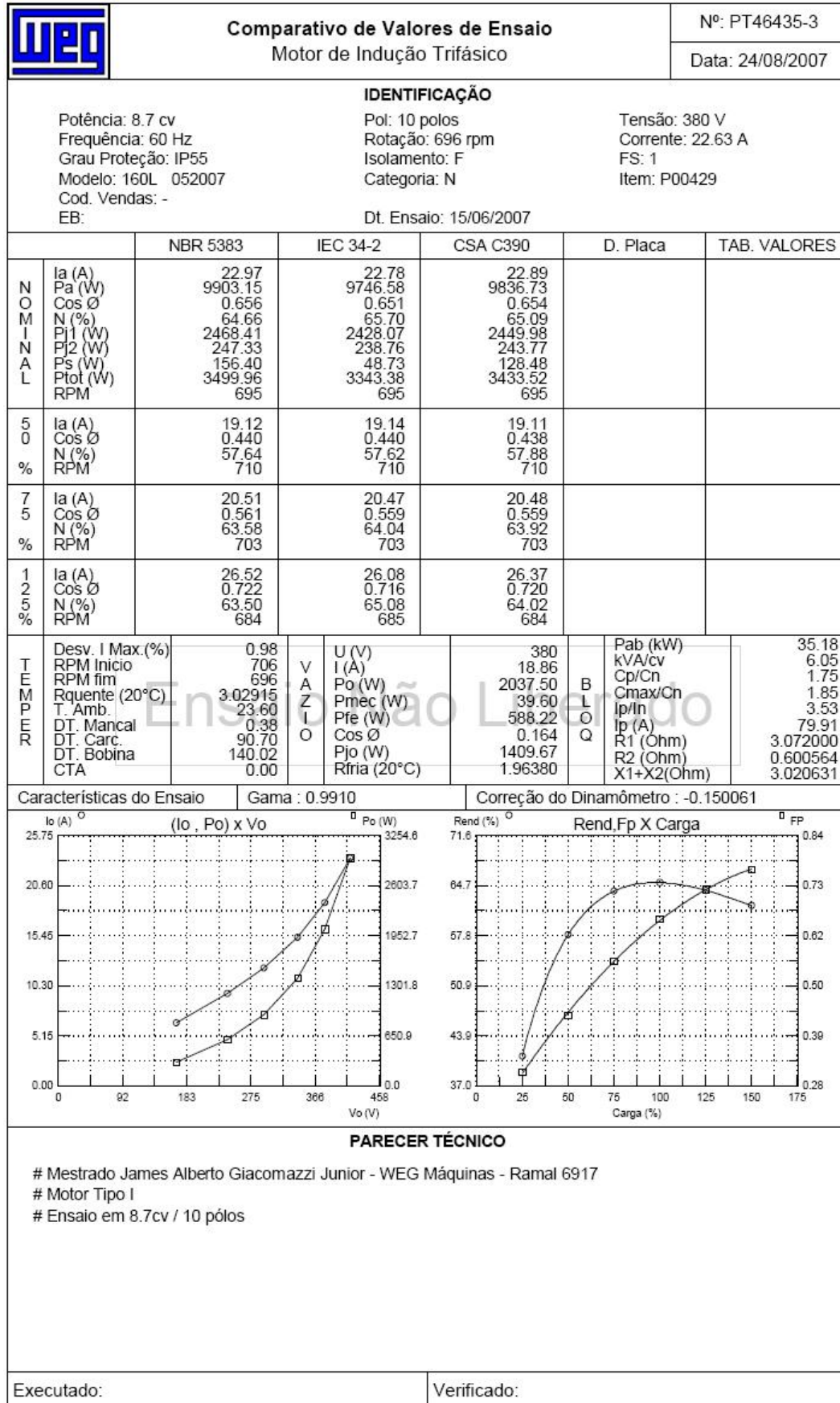


Figura 7.10 – Relatório de ensaio de performance do enrolamento PAM Tipo I na configuração de 10 pólos.


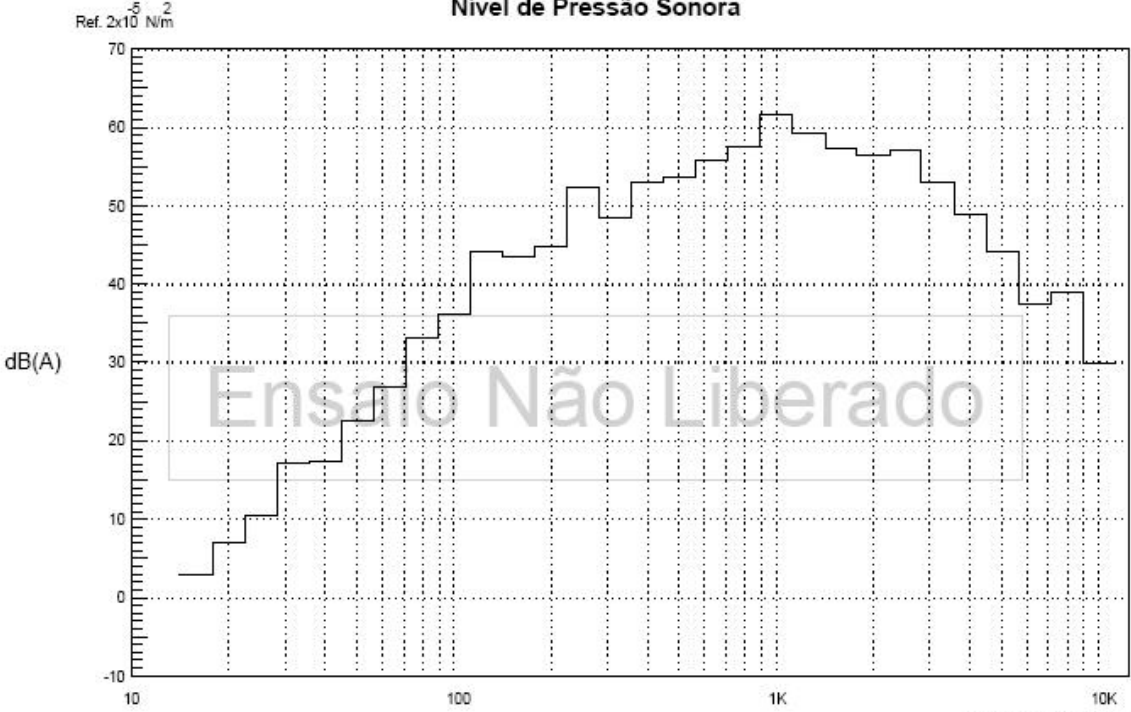
	Relatório de Ensaio de Ruído Análise de 1/3 de Oitava ISO1680/ISO3744		Nº: PT46435																																																																				
			Data: 28/05/2007																																																																				
Cliente : - Ordem de Compra : - Forma Construtiva : B3D																																																																							
Massa Aproximada : - kg																																																																							
IDENTIFICAÇÃO																																																																							
Modelo : 160L 21052007 Frequência : 60 Hz Rotação : 720 / 877 rpm Potência : 8.7 / 13.6 cv Tensão : 380 / 380 V Corrente : 20 / 26.3 A Ip/In : 6		Item : P00429 Categoria : B Regime : S1 Cl. de Isolamento : F Fator de Serviço : 1 Grau de Proteção : IP55 Cos Ø : - Rend. - 75% : - Rend. - 100% : - D.T. (K) : 80																																																																					
<p style="text-align: center;">Nível de Pressão Sonora</p>  <p style="text-align: right;">Frequência (Hz)</p>																																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Frequência Central (Hz)</th> <th>Pressão Sonora dB(A)</th> <th>Frequência Central (Hz)</th> <th>Pressão Sonora dB(A)</th> <th>Frequência Central (Hz)</th> <th>Pressão Sonora dB(A)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-</td><td>-</td><td>125.0</td><td>44.14</td><td>1250.0</td><td>59.23</td></tr> <tr><td>16.0</td><td>2.87</td><td>160.0</td><td>43.47</td><td>1600.0</td><td>57.26</td></tr> <tr><td>20.0</td><td>6.93</td><td>200.0</td><td>44.75</td><td>2000.0</td><td>56.54</td></tr> <tr><td>25.0</td><td>10.47</td><td>250.0</td><td>52.39</td><td>2500.0</td><td>57.02</td></tr> <tr><td>31.5</td><td>17.22</td><td>315.0</td><td>48.47</td><td>3150.0</td><td>53.02</td></tr> <tr><td>40.0</td><td>17.48</td><td>400.0</td><td>53.08</td><td>4000.0</td><td>48.92</td></tr> <tr><td>50.0</td><td>22.61</td><td>500.0</td><td>53.69</td><td>5000.0</td><td>44.15</td></tr> <tr><td>63.0</td><td>26.86</td><td>630.0</td><td>55.75</td><td>6300.0</td><td>37.46</td></tr> <tr><td>80.0</td><td>33.24</td><td>800.0</td><td>57.55</td><td>8000.0</td><td>38.92</td></tr> <tr><td>100.0</td><td>36.22</td><td>1000.0</td><td>61.59</td><td>10000.0</td><td>29.83</td></tr> </tbody> </table>						Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	-	-	125.0	44.14	1250.0	59.23	16.0	2.87	160.0	43.47	1600.0	57.26	20.0	6.93	200.0	44.75	2000.0	56.54	25.0	10.47	250.0	52.39	2500.0	57.02	31.5	17.22	315.0	48.47	3150.0	53.02	40.0	17.48	400.0	53.08	4000.0	48.92	50.0	22.61	500.0	53.69	5000.0	44.15	63.0	26.86	630.0	55.75	6300.0	37.46	80.0	33.24	800.0	57.55	8000.0	38.92	100.0	36.22	1000.0	61.59	10000.0	29.83
Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)																																																																		
-	-	125.0	44.14	1250.0	59.23																																																																		
16.0	2.87	160.0	43.47	1600.0	57.26																																																																		
20.0	6.93	200.0	44.75	2000.0	56.54																																																																		
25.0	10.47	250.0	52.39	2500.0	57.02																																																																		
31.5	17.22	315.0	48.47	3150.0	53.02																																																																		
40.0	17.48	400.0	53.08	4000.0	48.92																																																																		
50.0	22.61	500.0	53.69	5000.0	44.15																																																																		
63.0	26.86	630.0	55.75	6300.0	37.46																																																																		
80.0	33.24	800.0	57.55	8000.0	38.92																																																																		
100.0	36.22	1000.0	61.59	10000.0	29.83																																																																		
Nível Global de Pressão Sonora : 67.6 dB(A)																																																																							
Média dos pontos de Medição.			Observações																																																																				
Aprovação/Laboratório: WEG			Aprovação/Inspetor: CLIENTE																																																																				

Figura 7.11 – Relatório de ensaio de ruído do enrolamento PAM Tipo I na configuração de 8 pólos.


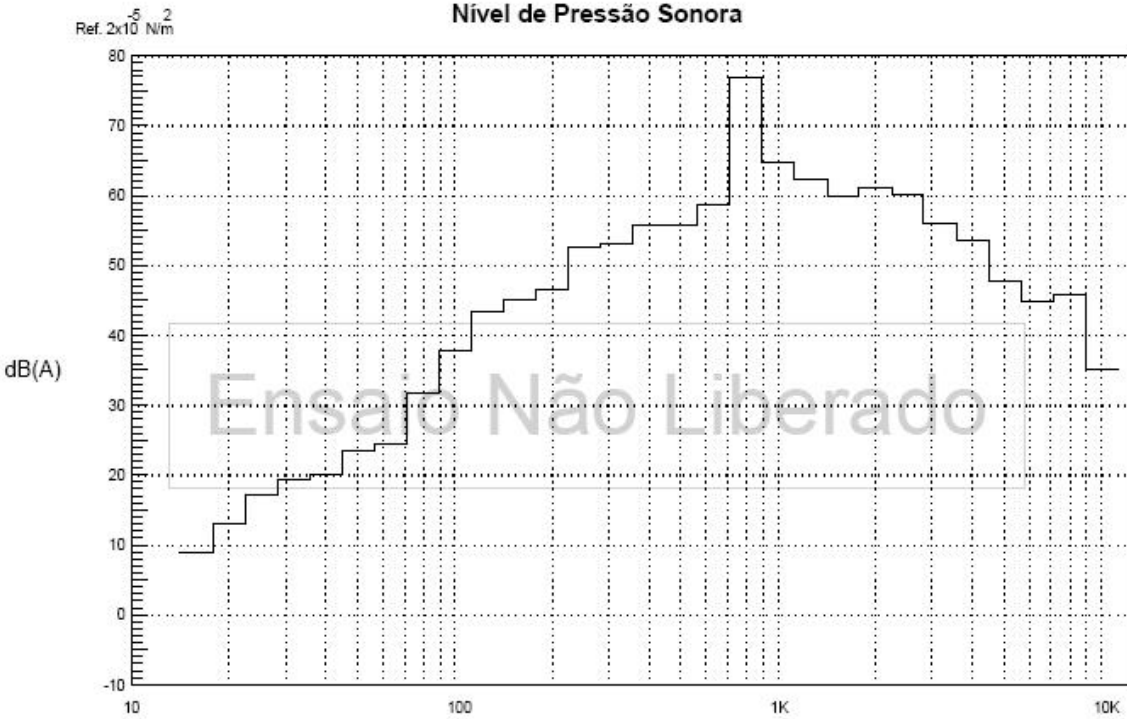
	Relatório de Ensaio de Ruído Análise de 1/3 de Oitava ISO1680/ISO3744		Nº: PT46435																																																																		
			Data: 28/05/2007																																																																		
Cliente : - Ordem de Compra : - Forma Construtiva : B3D																																																																					
Massa Aproximada : - kg																																																																					
IDENTIFICAÇÃO																																																																					
Modelo : 160L 21052007 Frequência : 60 Hz Rotação : 720 / 877 rpm Potência : 8.7 / 13.6 cv Tensão : 8.7 / 13.6 V Corrente : 20 / 26.3 A Ip/In : 6		Item : P00429 Categoria : N Regime : S1 Cl. de Isolamento : F Fator de Serviço : 1 Grau de Proteção : IP55 Cos Ø : - Rend. - 75% : - Rend. - 100% : - D.T. (K) : 80																																																																			
Nível de Pressão Sonora																																																																					
																																																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Frequência Central (Hz)</th> <th>Pressão Sonora dB(A)</th> <th>Frequência Central (Hz)</th> <th>Pressão Sonora dB(A)</th> <th>Frequência Central (Hz)</th> <th>Pressão Sonora dB(A)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-</td><td>-</td><td>125.0</td><td>43.38</td><td>1250.0</td><td>62.19</td></tr> <tr><td>16.0</td><td>8.94</td><td>160.0</td><td>45.20</td><td>1600.0</td><td>59.84</td></tr> <tr><td>20.0</td><td>13.09</td><td>200.0</td><td>46.59</td><td>2000.0</td><td>61.20</td></tr> <tr><td>25.0</td><td>17.14</td><td>250.0</td><td>52.64</td><td>2500.0</td><td>60.24</td></tr> <tr><td>31.5</td><td>19.50</td><td>315.0</td><td>53.14</td><td>3150.0</td><td>55.91</td></tr> <tr><td>40.0</td><td>20.05</td><td>400.0</td><td>55.76</td><td>4000.0</td><td>53.55</td></tr> <tr><td>50.0</td><td>23.47</td><td>500.0</td><td>55.76</td><td>5000.0</td><td>47.82</td></tr> <tr><td>63.0</td><td>24.42</td><td>630.0</td><td>58.72</td><td>6300.0</td><td>44.73</td></tr> <tr><td>80.0</td><td>31.71</td><td>800.0</td><td>76.90</td><td>8000.0</td><td>45.80</td></tr> <tr><td>100.0</td><td>37.79</td><td>1000.0</td><td>64.70</td><td>10000.0</td><td>35.21</td></tr> </tbody> </table>				Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	-	-	125.0	43.38	1250.0	62.19	16.0	8.94	160.0	45.20	1600.0	59.84	20.0	13.09	200.0	46.59	2000.0	61.20	25.0	17.14	250.0	52.64	2500.0	60.24	31.5	19.50	315.0	53.14	3150.0	55.91	40.0	20.05	400.0	55.76	4000.0	53.55	50.0	23.47	500.0	55.76	5000.0	47.82	63.0	24.42	630.0	58.72	6300.0	44.73	80.0	31.71	800.0	76.90	8000.0	45.80	100.0	37.79	1000.0	64.70	10000.0	35.21
Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)																																																																
-	-	125.0	43.38	1250.0	62.19																																																																
16.0	8.94	160.0	45.20	1600.0	59.84																																																																
20.0	13.09	200.0	46.59	2000.0	61.20																																																																
25.0	17.14	250.0	52.64	2500.0	60.24																																																																
31.5	19.50	315.0	53.14	3150.0	55.91																																																																
40.0	20.05	400.0	55.76	4000.0	53.55																																																																
50.0	23.47	500.0	55.76	5000.0	47.82																																																																
63.0	24.42	630.0	58.72	6300.0	44.73																																																																
80.0	31.71	800.0	76.90	8000.0	45.80																																																																
100.0	37.79	1000.0	64.70	10000.0	35.21																																																																
Nível Global de Pressão Sonora : 77.8 dB(A)																																																																					
Média dos pontos de Medição.		Observações																																																																			
Aprovação/Laboratório: WEG		Aprovação/Inspetor: CLIENTE																																																																			

Figura 7.12 – Relatório de ensaio de ruído do enrolamento PAM Tipo I na configuração de 10 pólos.


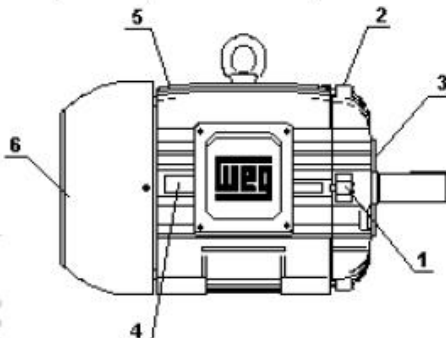
	Relatório de Ensaio de Vibração Motor de Indução Trifásico		Nº: PT46435		
			Data: 28/05/2007		
Cliente : - Ordem de Compra : - Forma Construtiva : B3D					
Massa Aproximada : - kg					
IDENTIFICAÇÃO					
Modelo : 160L 21052007 Frequência : 60 Hz Rotação : 720 / 877 rpm Potência : 8.7 / 13.6 cv Tensão : 380 / 380 V Corrente : 20 / 26.3 A Ip/In : 6	Item : P00429 Categoria : B Regime : S1	Cl. de Isolamento : F Fator de Serviço : 1 Grau de Proteção : IP55 Cos Ø : - Rend. - 75% : - Rend. - 100% : - D.T. (K) : 80			
ENSAIO DE VIBRAÇÃO - Conforme norma NBR 11390					
Identificação dos pontos de medição normalizados					
					
Velocidade de Vibração - (mm/s rms)					
Pontos de Medição					
1	2	3	4	5	6*
1.10	1.10	1.80	1.80	1.80	0.00
Valor máximo especificado conforme norma NBR 11390 : Grau N : 1.80 mm/s					
*) A medição no ponto 6 é realizada somente quando possível.					
Observações					
Aprovação/Laboratório: WEG			Aprovação/Inspetor: CLIENTE		

Figura 7.13 – Relatório de ensaio de vibração do enrolamento PAM Tipo I na configuração de 8 pólos.


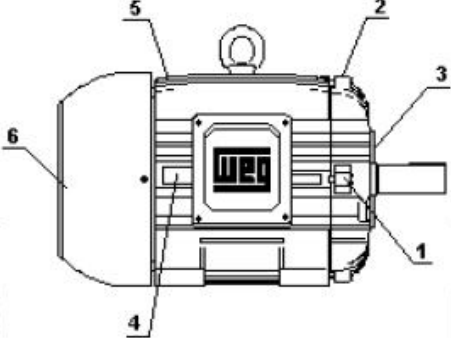
	Relatório de Ensaio de Vibração Motor de Indução Trifásico		Nº: PT46435		
			Data: 28/05/2007		
Cliente : - Ordem de Compra : - Forma Construtiva : B3D					
Massa Aproximada : - kg					
IDENTIFICAÇÃO					
Modelo : 160L 21052007 Frequência : 60 Hz Rotação : 720 / 877 rpm Potência : 8.7 / 13.6 cv Tensão : 8.7 / 13.6 V Corrente : 20 / 26.3 A Ip/In : 6	Item : P00429 Categoria : N Regime : S1	Cl. de Isolamento : F Fator de Serviço : 1 Grau de Proteção : IP55 Cos Ø : - Rend. - 75% : - Rend. - 100% : - D.T. (K) : 80			
ENSAIO DE VIBRAÇÃO - Conforme norma NBR 11390					
Identificação dos pontos de medição normalizados					
					
Velocidade de Vibração - (mm/s rms)					
Pontos de Medição					
1	2	3	4	5	6*
1.00	1.00	0.50	2.00	1.60	0.00
Valor máximo especificado conforme norma NBR 11390 : Grau N : 1.80 mm/s					
*) A medição no ponto 6 é realizada somente quando possível.					
Observações					
Aprovação/Laboratório: WEG			Aprovação/Inspetor: CLIENTE		

Figura 7.14 – Relatório de ensaio de vibração do enrolamento PAM Tipo I na configuração de 10 pólos.

PROTÓTIPO DO ENROLAMENTO PAM TIPO II

Na Figura 7.15 e na Figura 7.16 são apresentados os relatórios de ensaio de performance do protótipo PAM tipo II na configuração de 8 pólos e 10 pólos respectivamente.

Na Figura 7.17 e na Figura 7.18 são apresentados os relatórios de ensaio de ruído do protótipo PAM tipo II na configuração de 8 pólos e 10 pólos respectivamente.

Na Figura 7.19 e na Figura 7.20 são apresentados os relatórios de ensaio de vibração do protótipo PAM tipo II na configuração de 8 pólos e 10 pólos respectivamente.

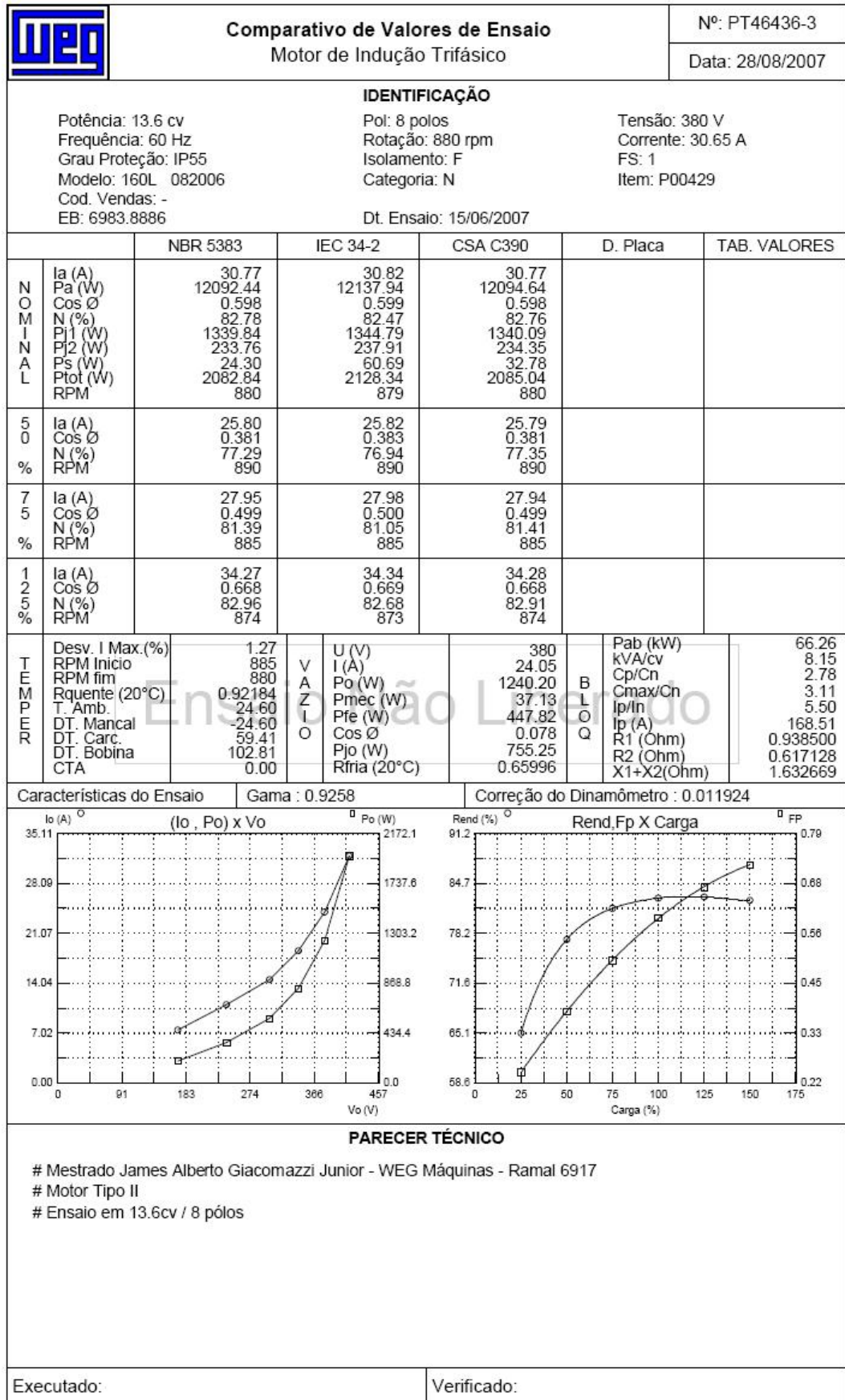


Figura 7.15 – Relatório de ensaio de performance do enrolamento PAM Tipo II na configuração de 8 pólos.


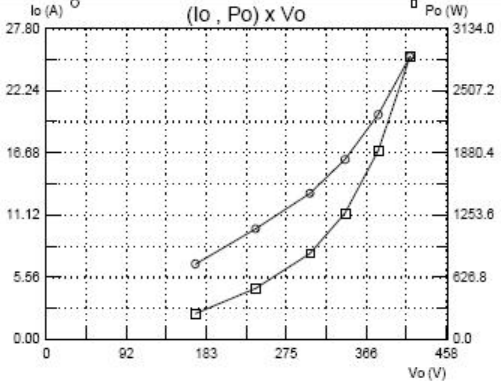
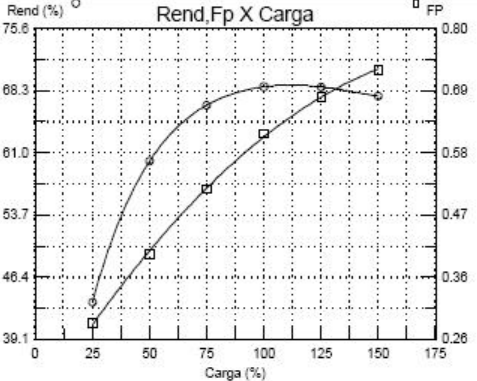
		Comparativo de Valores de Ensaio Motor de Indução Trifásico				Nº: PT46436-2					
						Data: 28/08/2007					
IDENTIFICAÇÃO											
Potência: 8.7 cv Frequência: 60 Hz Grau Proteção: IP55 Modelo: 160L 052007 Cod. Vendas: - EB: -				Pol: 10 polos Rotação: 698 rpm Isolamento: F Categoria: N		Tensão: 380 V Corrente: 23 A FS: 1 Item: P00429					
				Dt. Ensaio: 15/06/2007							
		NBR 5383		IEC 34-2		CSA C390		D. Placa		TAB. VALORES	
N O M I N A L	Ia (A)	23.21		23.20		23.12					
	Pa (W)	9408.01		9401.89		9321.41					
	Cos Ø	0.619		0.619		0.616					
	N (%)	68.06		68.11		68.69					
	Pj1 (W)	2300.30		2298.16		2280.68					
	Pj2 (W)	215.02		218.29		211.63					
	Ps (W)	54.26		47.01		20.90					
	Ptot (W)	3004.81		2998.69		2918.21					
RPM	697		697		697						
5 0 %	Ia (A)	20.08		20.09		20.06					
	Cos Ø	0.408		0.409		0.405					
	N (%)	59.52		59.32		59.96					
	RPM	710		710		710					
7 5 %	Ia (A)	21.23		21.24		21.18					
	Cos Ø	0.521		0.522		0.518					
	N (%)	66.01		65.91		66.54					
	RPM	704		704		704					
1 2 5 %	Ia (A)	26.02		25.98		25.86					
	Cos Ø	0.683		0.683		0.680					
	N (%)	67.96		68.15		68.69					
	RPM	690		689		690					
T E M P E R	Desv. I Max.(%)	1.16		V A Z I O	U (V)	380		B L O Q	Pab (kW)	37.30	
	RPM Início	0			I (A)	20.08			kVA/cv	6.47	
	RPM fim	698			Po (W)	1901.90			Cp/Cn	1.70	
	Rquente (20°C)	2.77253			Pmec (W)	18.59			Cmax/Cn	2.04	
	T. Amb.	25.00			Pfe (W)	416.65			Ip/In	3.72	
	DT. Mancal	25.00			Cos Ø	0.144			Ip (A)	85.54	
	DT. Carc.	91.00			Pjo (W)	1466.66			R1 (Ohm)	2.827000	
	DT. Bobina	136.50			Rfria (20°C)	1.81687			R2 (Ohm)	0.571237	
	CTA	0.00							X1+X2(Ohm)	2.861377	
	Características do Ensaio		Gama : 0.9435				Correção do Dinamômetro : 0.007997				
											
PARECER TÉCNICO											
# Mestrado James Alberto Giacomazzi Junior - WEG Máquinas - Ramal 6917											
# Motor Tipo II											
# Ensaio em 8.7cv / 10 pólos											
Executado:						Verificado:					

Figura 7.16 – Relatório de ensaio de performance do enrolamento PAM Tipo II na configuração de 10 pólos.


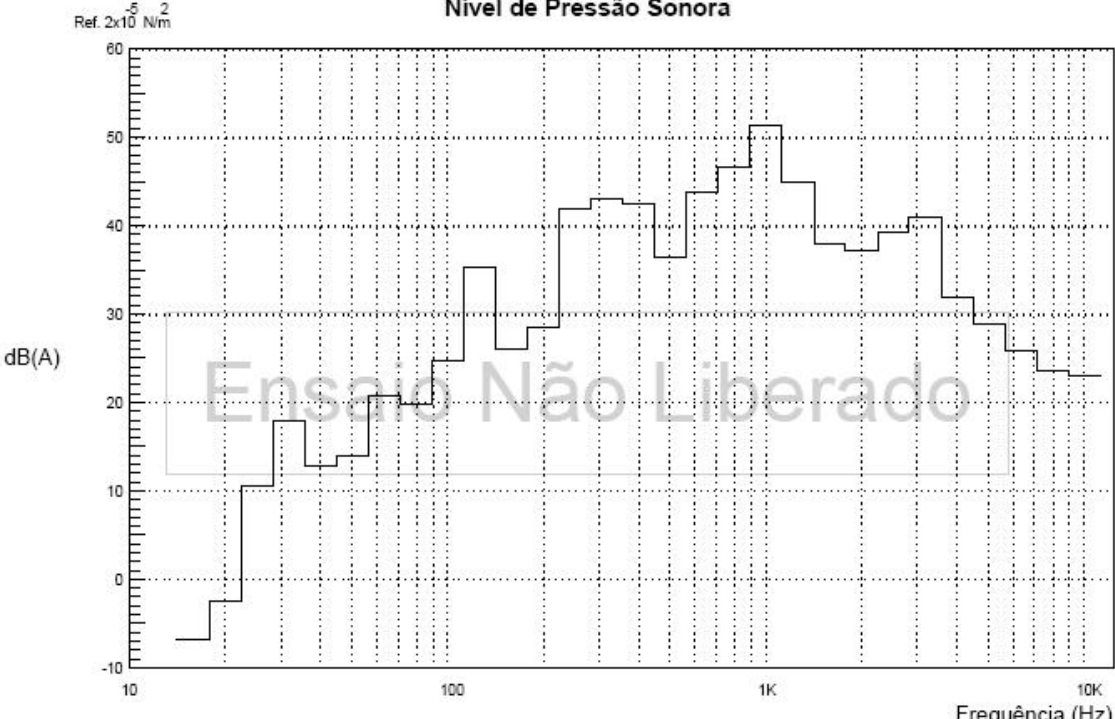
	Relatório de Ensaio de Ruído Análise de 1/3 de Oitava ISO1680/ISO3744		Nº: PT46436																																																																				
			Data: 01/06/2007																																																																				
Cliente : - Ordem de Compra : - Forma Construtiva : B3D																																																																							
Massa Aproximada : - kg																																																																							
IDENTIFICAÇÃO																																																																							
Modelo : 160L 17082006 Frequência : 60 Hz Rotação : 720 / 877 rpm Potência : 8.7 / 13.6 cv Tensão : 380 / 380 V Corrente : 26.3 / 20 A Ip/In : 7.5	Item : P00429 Categoria : N Regime : S1	Cl. de Isolamento : F Fator de Serviço : 1.15 Grau de Proteção : IP55 Cos Ø : 0.78 Rend. - 75% : 89.0 Rend. - 100% : 89.5 D.T. (K) : 80																																																																					
Nível de Pressão Sonora																																																																							
																																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Frequência Central (Hz)</th> <th>Pressão Sonora dB(A)</th> <th>Frequência Central (Hz)</th> <th>Pressão Sonora dB(A)</th> <th>Frequência Central (Hz)</th> <th>Pressão Sonora dB(A)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-</td><td>-</td><td>125.0</td><td>35.39</td><td>1250.0</td><td>44.86</td></tr> <tr><td>16.0</td><td>-6.75</td><td>160.0</td><td>26.10</td><td>1600.0</td><td>38.01</td></tr> <tr><td>20.0</td><td>-2.52</td><td>200.0</td><td>28.44</td><td>2000.0</td><td>37.24</td></tr> <tr><td>25.0</td><td>10.60</td><td>250.0</td><td>41.84</td><td>2500.0</td><td>39.31</td></tr> <tr><td>31.5</td><td>17.97</td><td>315.0</td><td>42.98</td><td>3150.0</td><td>40.91</td></tr> <tr><td>40.0</td><td>12.93</td><td>400.0</td><td>42.58</td><td>4000.0</td><td>31.94</td></tr> <tr><td>50.0</td><td>13.92</td><td>500.0</td><td>36.48</td><td>5000.0</td><td>28.94</td></tr> <tr><td>63.0</td><td>20.77</td><td>630.0</td><td>43.76</td><td>6300.0</td><td>25.93</td></tr> <tr><td>80.0</td><td>19.92</td><td>800.0</td><td>46.72</td><td>8000.0</td><td>23.52</td></tr> <tr><td>100.0</td><td>24.67</td><td>1000.0</td><td>51.45</td><td>10000.0</td><td>23.04</td></tr> </tbody> </table>						Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	-	-	125.0	35.39	1250.0	44.86	16.0	-6.75	160.0	26.10	1600.0	38.01	20.0	-2.52	200.0	28.44	2000.0	37.24	25.0	10.60	250.0	41.84	2500.0	39.31	31.5	17.97	315.0	42.98	3150.0	40.91	40.0	12.93	400.0	42.58	4000.0	31.94	50.0	13.92	500.0	36.48	5000.0	28.94	63.0	20.77	630.0	43.76	6300.0	25.93	80.0	19.92	800.0	46.72	8000.0	23.52	100.0	24.67	1000.0	51.45	10000.0	23.04
Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)																																																																		
-	-	125.0	35.39	1250.0	44.86																																																																		
16.0	-6.75	160.0	26.10	1600.0	38.01																																																																		
20.0	-2.52	200.0	28.44	2000.0	37.24																																																																		
25.0	10.60	250.0	41.84	2500.0	39.31																																																																		
31.5	17.97	315.0	42.98	3150.0	40.91																																																																		
40.0	12.93	400.0	42.58	4000.0	31.94																																																																		
50.0	13.92	500.0	36.48	5000.0	28.94																																																																		
63.0	20.77	630.0	43.76	6300.0	25.93																																																																		
80.0	19.92	800.0	46.72	8000.0	23.52																																																																		
100.0	24.67	1000.0	51.45	10000.0	23.04																																																																		
Nível Global de Pressão Sonora : 55.3 dB(A)																																																																							
Média dos pontos de Medição.			Observações																																																																				
Aprovação/Laboratório: WEG			Aprovação/Inspetor: CLIENTE																																																																				

Figura 7.17 – Relatório de ensaio de ruído do enrolamento PAM Tipo II na configuração de 8 pólos.


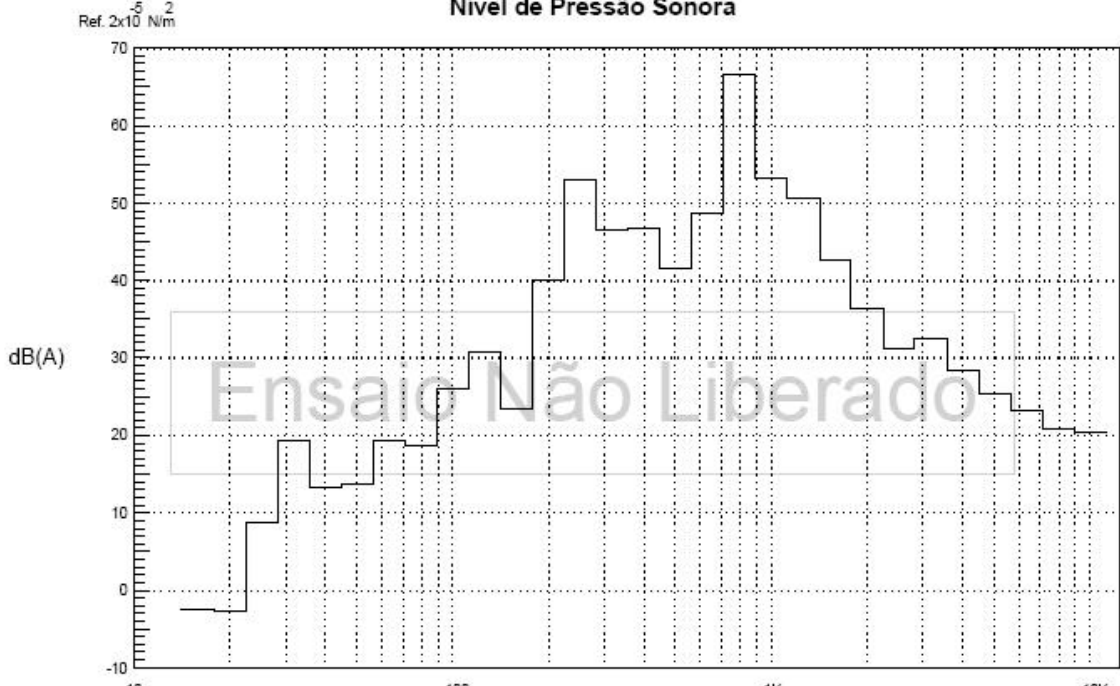
	Relatório de Ensaio de Ruído Análise de 1/3 de Oitava ISO1680/ISO3744		Nº: PT46436																																																																				
			Data: 01/06/2007																																																																				
Cliente : - Ordem de Compra : - Forma Construtiva : B3D																																																																							
Massa Aproximada : - kg																																																																							
IDENTIFICAÇÃO																																																																							
Modelo : 160L 29052007 Frequência : 60 Hz Rotação : 720 / 877 rpm Potência : 8.7 / 13.6 cv Tensão : 380 / 380 V Corrente : 26.3 / 20 A Ip/In : -	Item : P00429 Categoria : N Regime : S1	Cl. de Isolamento : B Fator de Serviço : 1 Grau de Proteção : IP55 Cos Ø : - Rend. - 75% : - Rend. - 100% : - D.T. (K) : -																																																																					
Nível de Pressão Sonora																																																																							
																																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Frequência Central (Hz)</th> <th>Pressão Sonora dB(A)</th> <th>Frequência Central (Hz)</th> <th>Pressão Sonora dB(A)</th> <th>Frequência Central (Hz)</th> <th>Pressão Sonora dB(A)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-</td><td>-</td><td>125.0</td><td>30.83</td><td>1250.0</td><td>50.68</td></tr> <tr><td>16.0</td><td>-2.48</td><td>160.0</td><td>23.43</td><td>1600.0</td><td>42.66</td></tr> <tr><td>20.0</td><td>-2.82</td><td>200.0</td><td>40.00</td><td>2000.0</td><td>36.42</td></tr> <tr><td>25.0</td><td>8.75</td><td>250.0</td><td>53.03</td><td>2500.0</td><td>31.25</td></tr> <tr><td>31.5</td><td>19.29</td><td>315.0</td><td>46.43</td><td>3150.0</td><td>32.49</td></tr> <tr><td>40.0</td><td>13.22</td><td>400.0</td><td>46.67</td><td>4000.0</td><td>28.44</td></tr> <tr><td>50.0</td><td>13.70</td><td>500.0</td><td>41.60</td><td>5000.0</td><td>25.39</td></tr> <tr><td>63.0</td><td>19.33</td><td>630.0</td><td>48.69</td><td>6300.0</td><td>23.29</td></tr> <tr><td>80.0</td><td>18.75</td><td>800.0</td><td>66.69</td><td>8000.0</td><td>20.77</td></tr> <tr><td>100.0</td><td>26.04</td><td>1000.0</td><td>53.12</td><td>10000.0</td><td>20.36</td></tr> </tbody> </table>						Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	-	-	125.0	30.83	1250.0	50.68	16.0	-2.48	160.0	23.43	1600.0	42.66	20.0	-2.82	200.0	40.00	2000.0	36.42	25.0	8.75	250.0	53.03	2500.0	31.25	31.5	19.29	315.0	46.43	3150.0	32.49	40.0	13.22	400.0	46.67	4000.0	28.44	50.0	13.70	500.0	41.60	5000.0	25.39	63.0	19.33	630.0	48.69	6300.0	23.29	80.0	18.75	800.0	66.69	8000.0	20.77	100.0	26.04	1000.0	53.12	10000.0	20.36
Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)	Frequência Central (Hz)	Pressão Sonora dB(A)																																																																		
-	-	125.0	30.83	1250.0	50.68																																																																		
16.0	-2.48	160.0	23.43	1600.0	42.66																																																																		
20.0	-2.82	200.0	40.00	2000.0	36.42																																																																		
25.0	8.75	250.0	53.03	2500.0	31.25																																																																		
31.5	19.29	315.0	46.43	3150.0	32.49																																																																		
40.0	13.22	400.0	46.67	4000.0	28.44																																																																		
50.0	13.70	500.0	41.60	5000.0	25.39																																																																		
63.0	19.33	630.0	48.69	6300.0	23.29																																																																		
80.0	18.75	800.0	66.69	8000.0	20.77																																																																		
100.0	26.04	1000.0	53.12	10000.0	20.36																																																																		
Nível Global de Pressão Sonora : 67.3 dB(A)																																																																							
Média dos pontos de Medição.			Observações																																																																				
Aprovação/Laboratório: WEG			Aprovação/Inspetor: CLIENTE																																																																				

Figura 7.18 – Relatório de ensaio de ruído do enrolamento PAM Tipo II na configuração de 10 pólos.


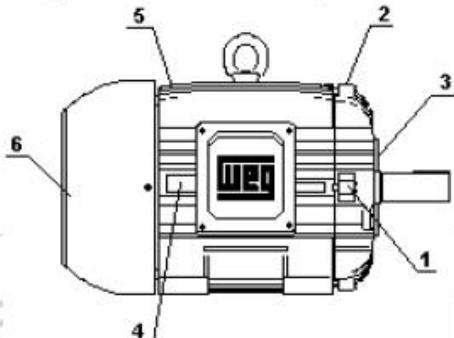
	Relatório de Ensaio de Vibração Motor de Indução Trifásico		Nº: PT46436		
			Data: 01/06/2007		
Cliente : - Ordem de Compra : - Forma Construtiva : B3D					
Massa Aproximada : - kg					
IDENTIFICAÇÃO					
Modelo : 160L 17082006 Frequência : 60 Hz Rotação : 720 / 877 rpm Potência : 8.7 / 13.6 cv Tensão : 380 / 380 V Corrente : 26.3 / 20 A Ip/In : 7.5		Item : P00429 Categoria : N Regime : S1 Cl. de Isolamento : F Fator de Serviço : 1.15 Grau de Proteção : IP55 Cos Ø : 0.78 Rend. - 75% : 89.0 Rend. - 100% : 89.5 D.T. (K) : 80			
ENSAIO DE VIBRAÇÃO - Conforme norma NBR 11390					
Identificação dos pontos de medição normalizados					
					
Velocidade de Vibração - (mm/s rms)					
Pontos de Medição					
1	2	3	4	5	6*
0.40	0.30	0.50	0.30	0.30	0.00
Valor máximo especificado conforme norma NBR 11390 : Grau N : 1.80 mm/s					
*) A medição no ponto 6 é realizada somente quando possível.					
Observações					
Aprovação/Laboratório: WEG			Aprovação/Inspetor: CLIENTE		

Figura 7.19 – Relatório de ensaio de vibração do enrolamento PAM Tipo II na configuração de 8 pólos.


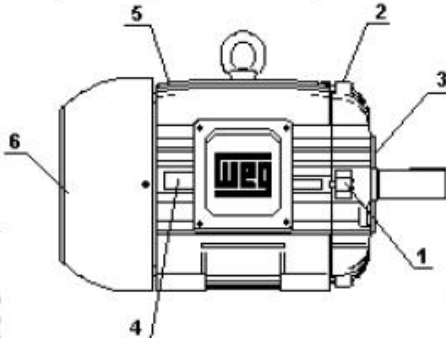
	Relatório de Ensaio de Vibração Motor de Indução Trifásico		Nº: PT46436																					
			Data: 01/06/2007																					
Cliente : - Ordem de Compra : - Forma Construtiva : B3D																								
Massa Aproximada : - kg																								
IDENTIFICAÇÃO																								
<table border="0"> <tr> <td>Modelo : 160L 29052007</td> <td>Item : P00429</td> <td>Cl. de Isolamento : B</td> </tr> <tr> <td>Frequência : 60 Hz</td> <td>Categoria : N</td> <td>Fator de Serviço : 1</td> </tr> <tr> <td>Rotação : 720 / 877 rpm</td> <td>Regime : S1</td> <td>Grau de Proteção : IP55</td> </tr> <tr> <td>Potência : 8.7 / 13.6 cv</td> <td></td> <td>Cos Ø : -</td> </tr> <tr> <td>Tensão : 380 / 380 V</td> <td></td> <td>Rend. - 75% : -</td> </tr> <tr> <td>Corrente : 26.3 / 20 A</td> <td></td> <td>Rend. - 100% : -</td> </tr> <tr> <td>Ip/In : -</td> <td></td> <td>D.T. (K) : -</td> </tr> </table>				Modelo : 160L 29052007	Item : P00429	Cl. de Isolamento : B	Frequência : 60 Hz	Categoria : N	Fator de Serviço : 1	Rotação : 720 / 877 rpm	Regime : S1	Grau de Proteção : IP55	Potência : 8.7 / 13.6 cv		Cos Ø : -	Tensão : 380 / 380 V		Rend. - 75% : -	Corrente : 26.3 / 20 A		Rend. - 100% : -	Ip/In : -		D.T. (K) : -
Modelo : 160L 29052007	Item : P00429	Cl. de Isolamento : B																						
Frequência : 60 Hz	Categoria : N	Fator de Serviço : 1																						
Rotação : 720 / 877 rpm	Regime : S1	Grau de Proteção : IP55																						
Potência : 8.7 / 13.6 cv		Cos Ø : -																						
Tensão : 380 / 380 V		Rend. - 75% : -																						
Corrente : 26.3 / 20 A		Rend. - 100% : -																						
Ip/In : -		D.T. (K) : -																						
ENSAIO DE VIBRAÇÃO - Conforme norma NBR 11390																								
Identificação dos pontos de medição normalizados																								
																								
Velocidade de Vibração - (mm/s rms)																								
Pontos de Medição																								
1	2	3	4	5	6*																			
1.00	0.70	0.40	0.90	0.90	0.00																			
Valor máximo especificado conforme norma NBR 11390 : Grau N : 1.80 mm/s																								
*) A medição no ponto 6 é realizada somente quando possível.																								
Observações																								
Aprovação/Laboratório: WEG			Aprovação/Inspetor: CLIENTE																					

Figura 7.20 – Relatório de ensaio de vibração do enrolamento PAM Tipo II na configuração de 10 pólos.